

冬季北太平洋域における大気内部駆動 南北テレコネクションパターンの異なる海洋条件による変化

*佐藤 瞭, 小坂 優 (東京大学先端科学技術研究センター)

1. はじめに

冬季北太平洋域で卓越する長周期大気変動パターンとして、太平洋-北米 (PNA) パターン、西太平洋 (WP) パターン、熱帯-北半球 (TNH) パターンなどが知られている。これらのパターンの形成・維持メカニズムについての包括的な理解のため、著者らの過去の研究では、冬季北太平洋上の様々な地点に現れる286のテレコネクションパターンを系統的に抽出し、各パターンのエネルギー収支を調査した (Sato et al. 2025)。気候平均場や高周波擾乱からのエネルギー変換の効率が高いテレコネクションパターンほど、パターンの持つ全エネルギーが高くなる傾向があることが分かった。この結果は、特定のテレコネクションパターンが他に比べて卓越することのエネルギー論的説明を与えるとともに、異なる背景場のもとでは卓越テレコネクションパターンが変化する可能性を示唆する。

一方で、Chapman et al. (2021) により、冬季北太平洋上の大気内部変動の大きさが、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) の位相によって変化することが報告されている。具体的には、大規模アンサンブル大気大循環モデル実験データセット d4PDF における月平均200hPa ジオポテンシャル高度のメンバー間変動 (i.e., 大気内部変動) の振幅が、北太平洋上のほとんどの領域で La Niña 時に大きくなる。これは中高緯度にもたらされる ENSO の影響に対する大気の“ノイズ”の、ENSO 位相間の非対称性を意味する。この内部変動の変調をもたらす要因については、熱帯の降水変動の変調以外に、El Niño-La Niña 間の平均場の違いに伴うエネルギー変換の変調などが指摘されているが (Abid et al. 2015), さ

らなる定量的なメカニズム理解が必要である。

この内部変動の変調メカニズムの理解に向け、本研究では冬季北太平洋域で卓越する南北テレコネクションパターン群に注目し、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) の異なる位相におけるそれらの特性の違いを系統的に調査した。またエネルギー論的な観点からこれらパターン群の特性変化の理解を試みる。d4PDF を用いることで大気内部変動を外部強制に対する応答から明瞭に分離し、海面水温変動に直接駆動されない変動の変調に着目する。

2. テレコネクションパターン群の系統的抽出

気象研究所の MRI-AGCM3.2 による d4PDF 大規模全球大気大循環モデル実験データセット (Mizuta et al. 2017) から、過去実験 (100 メンバー) の 60 年間 (1951/52-2010/11 年) に渡る冬季3ヶ月 (12, 1, 2月) の月平均データを用いた。

まず、COBE-SST2 (Hirahara et al. 2014) を用いて、Niño3.4 海域における海面水温 (SST) の、線形トレンドを除去した月平均偏差の領域平均が $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ を上回る/下回る月を、El Niño/La Niña 月と定めた。結果として、それぞれ 34/35 ヶ月の El Niño/La Niña 月が抽出された。

大気の内変動を、アンサンブル平均からのずれとして、各月、アンサンブルメンバーごとに定義する。データを El Niño/La Niña 月に分け、それぞれの期間から偏差パターンを系統的に抽出した。南北双極子の気圧偏差を持つ大気循環偏差場を北太平洋全域に渡って抽出するために、北太平洋域を緯度・経度それぞれ 5° 間隔で設定した各地点 (計286点) における 500hPa 東西風偏差を参照時系列とし、これに対して線

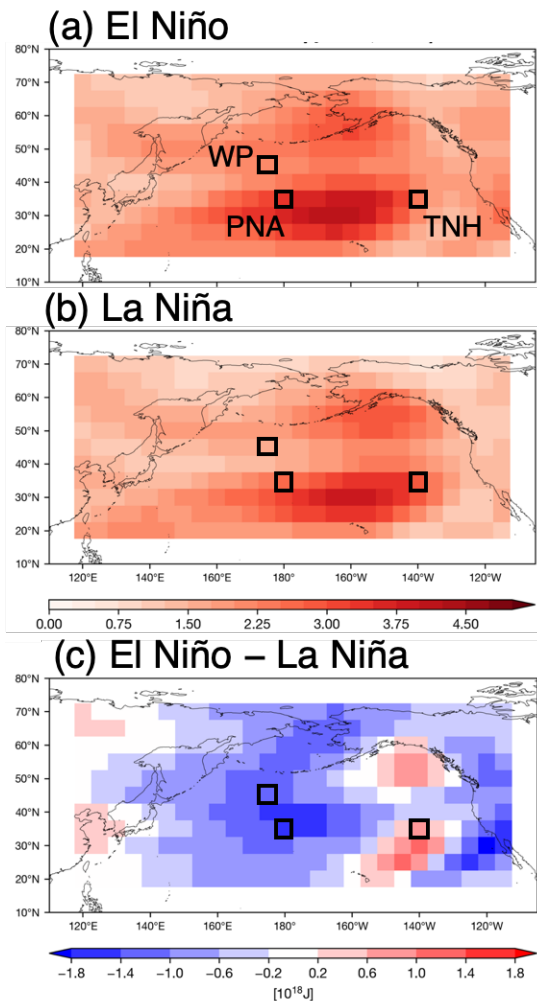


図 1. (a, b) d4PDF 過去実験の内部変動のうち, (a) El Niño, (b) La Niña の月からそれぞれ抽出された, 各地点の 500hPa 東西風への回帰偏差パターンに伴う, 北半球対流圏 (10-85° N, 地表-100 hPa) で積算された全エネルギー (KE + APE)。各参照点の位置に示す。(c) (a)と(b)の差。WP, PNA, TNH パターンに対応する参照点の位置を四角で示す。

形回帰することで, それぞれ 286 個の偏差パターンを得た。

3. ENSO の異なる位相に伴う振幅変化

まず, 冬季北太平洋上の南北テレコネクションパターンの振幅を評価するために, El Niño/La Niña それぞれの条件のもとで抽出された全 286 個のパターンに伴う, 北半球対流圏 (10°-85°N,

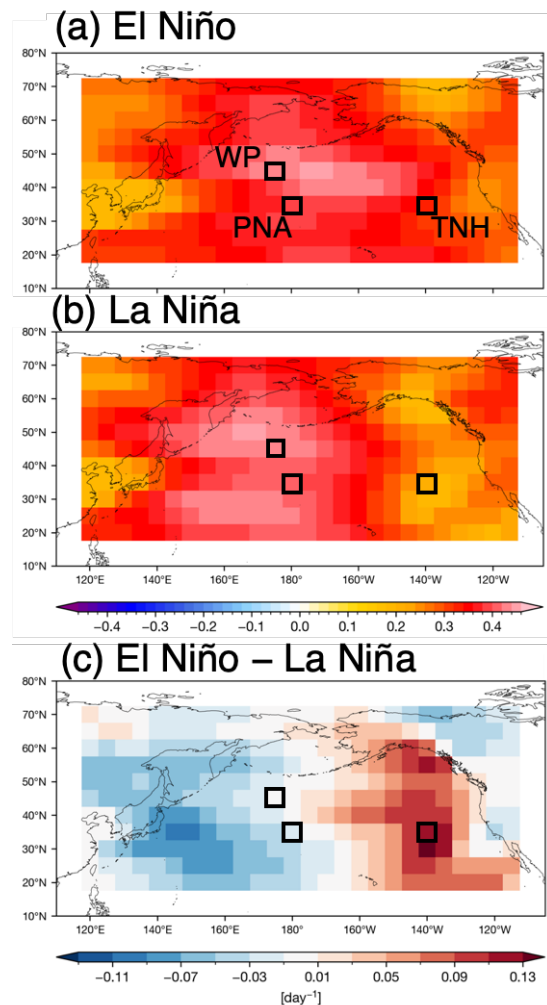
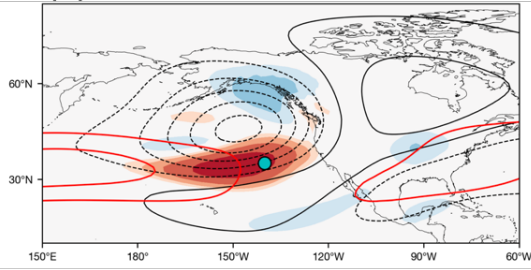


図 2. 図 1 と同様。ただし, (a, b) 抽出された計 286 の回帰偏差パターンに対して北半球対流圏 (10-85° N, 地表-100 hPa) で評価された正味エネルギー変換効率 ($CK+CP+CK_{HF}+CP_{HF}$), 及び, (c) その El Niño-La Niña 間の差を示す。循環偏差場がエネルギーを獲得する時, エネルギー変換効率が正。

地表-100hPa) で積算された全エネルギー (運動エネルギー KE + 有効位置エネルギー APE) を評価した (図 1)。図 1(a, b) から, El Niño/La Niña 両条件に共通して, 内部駆動循環偏差パターンの振幅はパターンの現れる場所によって大きく異なる様子が分かる。北太平洋上に 2 つの極大が存在し, 亜熱帯の極大は PNA パターン, 及び TNH パターンに対応する。海盆上の他の領

(a) El Niño



(b) La Niña

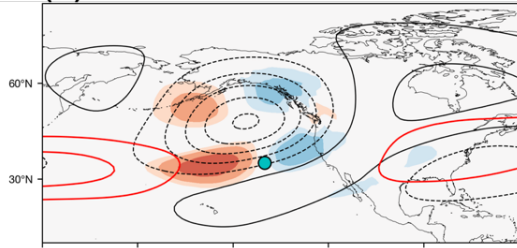


図 3. d4PDF 過去実験の (a) El Niño 時, (b) La Niña 時における内部変動から抽出された TNH パターンそれぞれに対して評価された, 300hPa における順圧エネルギー変換 CK (陰影)。黒の等値線は TNH パターンに伴う 300hPa ジオポテンシャル高度偏差 (20m 毎, 破線は負値) を表す。また, 同気圧面における, (a) El Niño 時, (b) La Niña 時における背景場の平均東西風を赤の等値線 (30, 50 ms^{-1}) で表す。

域にできるパターン (e.g., WP パターン) や大陸上に現れるものに比べて, これらのパターンはよりエネルギー的に卓越していることが分かる。

一方で, 両者の差に注目すると, 海盆上のほとんどの場所において, La Niña 時に内部駆動パターンの振幅が強くなっていることが分かった。差が最大となるパターンは PNA パターンに似た構造を有しており, また La Niña 時に PNA パターンが有する全エネルギーは El Niño 時のそれに比べて 58% も高い。北太平洋東部の一部の領域にできるパターンはむしろ El Niño 時の方が高いエネルギーを有しており, TNH パターンもこれに該当する。このような El Niño-La Niña 間の内部駆動パターンの振幅変調の空間方向の

分布は, Chapman et al. (2021) と整合的である。

4. エネルギー論的考察

これらの対照的な分布がどの程度中高緯度の気候力学によって説明され得るのかを確かめるために, El Niño/La Niña 条件下それぞれのもとで得られた計 286 の循環偏差パターンに対して, 気候平均場からの順圧エネルギー変換 CK, 傾圧エネルギー変換 CP, 周期 8 日以下の短周期擾乱からのフィードバック $\text{CK}_{\text{HF}} + \text{CP}_{\text{HF}}$ を評価した。それらの北半球対流圏 (10°-85°N, 地表~100hPa) に渡る積分値を, 偏差場に伴う KE + APE の同領域での積分値で規格化することで, エネルギー変換効率を評価した (Satoh et al. 2025; Tanaka et al. 2016; Kosaka and Nakamura 2010)。逆数は, 特定の変換過程によって偏差場の全エネルギーが賄われる日数を表す。

それぞれの回帰偏差場に対し, 全てのエネルギー変換を足し合わせた正味のエネルギー変換効率を, その基準とした 500hPa 東西風の参照点の位置に示す (図 2)。El Niño/La Niña 共に, 正味変換効率は, 海盆上で高く, 大陸上で低い分布を示している (図 2a, b)。これは, 海盆中央にできるパターンが他のものに比べてより効率的に背景場・高周波擾乱場からエネルギーを受け取っていることを意味する。図 2(c) に示された El Niño-La Niña 間の差に注目すると, El Niño 時に, 北太平洋東部で効率上昇, 西部で低下といった対照的な分布が明瞭であった。これはエネルギー分布の差 (図 1c) とある程度類似する分布である。この結果は, 中高緯度大気内部の力学が, 一部の内部駆動テレコネクションパターンについては, El Niño-La Niña 間の振幅変化についてある程度の説明を与えることを意味する。

図 1(c) に示される正味変換効率の差を各項に分解すると, 順圧エネルギー変換効率の差が

この東西方向の対照的分布に対して支配的な寄与を持っており、傾圧エネルギー変換・高周波擾乱からのフィードバックの効率変化はほとんど無視できることが分かった (図略)。すなわち、各パターンの維持メカニズムの El Niño-La Niña 間の違いに対しては、主に背景流との運動エネルギーの変換の効率変化が重要であった。このことは、TNH パターンを含む北太平洋東部のパターンについて、振幅変化 (図 1c) へのエネルギー論的理解を提示する。図 3 は、El Niño 時、La Niña 時それぞれにおける、対流圏上層での TNH パターンに対する順圧エネルギー変換であり、それぞれの期間における背景東西風と共に示してある。El Niño 時には、北太平洋ジェットがより東に伸長し、これに伴って背景東西風の東西勾配 ($-\partial \bar{u} / \partial x$) が強いジェットの出口領域も東に移動し、亜熱帯太平洋東部に位置する TNH パターンの節により近づく。順圧エネルギー変換はジェットの出口領域に東西風偏差が重なった時により強く作用するため (Simmons et al. 1983)、結果として、順圧エネルギー変換効率が高くなり、パターンがより強く成長・維持され则认为られる。

上記のエネルギー論的説明は一部のパターンのエネルギー変化を説明し得るものの、すべてのパターンに対して適用できるわけではない。エネルギー差と正味変換効率の差 (図 1c と図 2c) の分布は、特に海盆中央で符号が整合的ではなく、実際、286 のパターンに渡る両変数の間の相関係数は 0.31 であった。PNA パターンや WP パターンのような、海盆中央での El Niño に伴う大きな振幅低下は本研究でのエネルギー論の枠組みからは解釈し得ず、これらのパターンの振幅変調に対する別の要因を示唆する。例えば熱帯降水の内部変動は ENSO の位相による変調を受けるが、これが中高緯度のテレコネクションパターンの励起の仕方を変える可能性

がある。これについては現在調査中である。

参考文献

- Abid, M. A., et al., 2015, *J. Climate*, **28**, 8347–8362.
 Chapman, W., et al., 2021, *J. Climate*, **34**, 5899–5921.
 Hirahara, S. et al., 2014, *J. Climate*, **27** (1), 57–75.
 Kosaka, Y., and H. Nakamura, 2010, *J. Climate*, **23**, 5085–5108.
 Mizuta, R., et al., 2017, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98** (7), 1383–1398.
 Satoh, R., et al., 2025, *J. Climate*, **38**, 611–626.
 Simmons, A. J., et al., 1983, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1363–1392.
 Tanaka, S., et al., 2016, *J. Climate*, **29**, 6597–6616.