

冬季北太平洋域における南北テレコネクションの温暖化による変化に関するエネルギー論的考察

*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、北太平洋振動(NPO)、及び西太平洋(WP)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、気候平均場からの順圧エネルギー変換や高周波擾乱によるフィードバックの観点からこれまで多くの研究がなされてきたが、近年は傾圧的な過程を含む統一的なエネルギー論的な側面からの研究も行われている[1][2]。このエネルギー論的手法は、様々な維持過程の相対的な重要性を定量的に比較できるだけでなく、異なる振幅を持つ循環偏差パターン同士で比較することが可能である。過去の研究は気候平均場と循環偏差場の相対的な位置関係によって維持メカニズムのエネルギーの特徴が変化することを示唆するが、特定の卓越変動パターンにのみ着目した研究がほとんどであり、なぜその卓越変動パターンが他のパターンに比べて卓越するのかまでは説明しない。また、地球温暖化の進行に伴って卓越変動パターンがどのような変調を受けるのかについて、包括的な知見は十分に得られていない。

本研究は、冬季北太平洋上のさまざまな位置にできる南北双極子構造の気圧偏差場を持つ大気循環変動について、その維持メカニズムを系統的に調査・比較する。特に、大規模アンサンブル実験データセット d4PDF を用いることで SST 等の外部強制に駆動されない変動成分を明瞭に分離し、大気内部過程の働きに着目する。また、温暖化した気候において卓越変動パターンの振る舞いがどのように変わるのかについて、d4PDF の 4 度温暖化実験を用いて調査する。

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 [3] から、過去実験 (100 メンバ) と 4 度温暖化実験 (90 メンバ; 15 メンバ×6 実験) の 60 年間 (それぞれ 1951/52-2010/11 年と 2051/52-2110/11 年) に渡る冬季 3 ヶ月 (12, 1, 2 月) の月平均データを用いた。4 度温暖化実験で与えられた下部境界条件の 1 つである海面水温 (SST) は、CMIP5 に参加する異なる 6 つの気候モデルでシミュレートされた将来 SST 変化分布を、観測された SST 変動に加えることによって作成された。

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ごとに定義する。温暖化実験においては、6 つの実験ごとにアンサンブル平均が定義される。両実験共に、メンバ毎の内変動すべてを結合し (18,000 ヶ月及び 16,200 ヶ月分)、それら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 500 hPa 東西風偏差を参照時系列とし、これに対して線形回帰することで、それぞれ 286 個の南北テレコネクションに伴う偏差パターンを得た。

3. 温暖化による振幅変化

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卓越性を評価するために、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, 地表-100hPa) で積算された全エネルギー

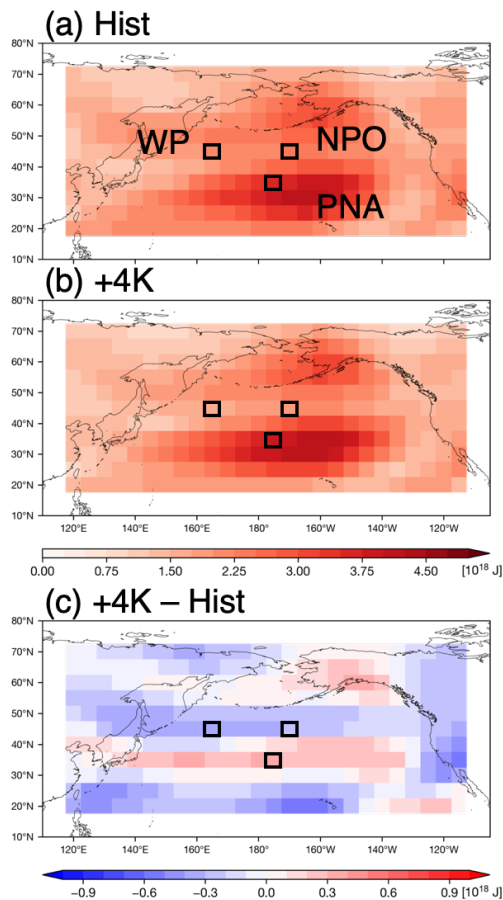


図 1. (a, b) d4PDF (a) 過去実験, (b) 4 度温暖化実験の内部変動における, 各地点の 500hPa 東西風への回帰偏差パターンに伴う, 北半球対流圏 (10-85°N, 地表-100 hPa) で積算された全エネルギー (KE + APE)。各参照点の位置に示している。(c) (b)と(a)の差。WP パターン, NPO, PNA パターンに対応する参照点の位置を四角で示す。

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)に示されるように, 過去実験における循環偏差の振幅はパターンの現れる場所によって大きく異なる。北太平洋上に 2 つの極大が存在し, 亜熱帯の極大は PNA パターンに対応する。このような特徴は温暖化実験においても概ね変わらず (図 1b), 将来気候においても PNA パターンが他に比べて卓越することが示唆される。

さらに, 過去実験, 温暖化実験の間で各パターンに伴う全エネルギーの比較から, 振幅の増

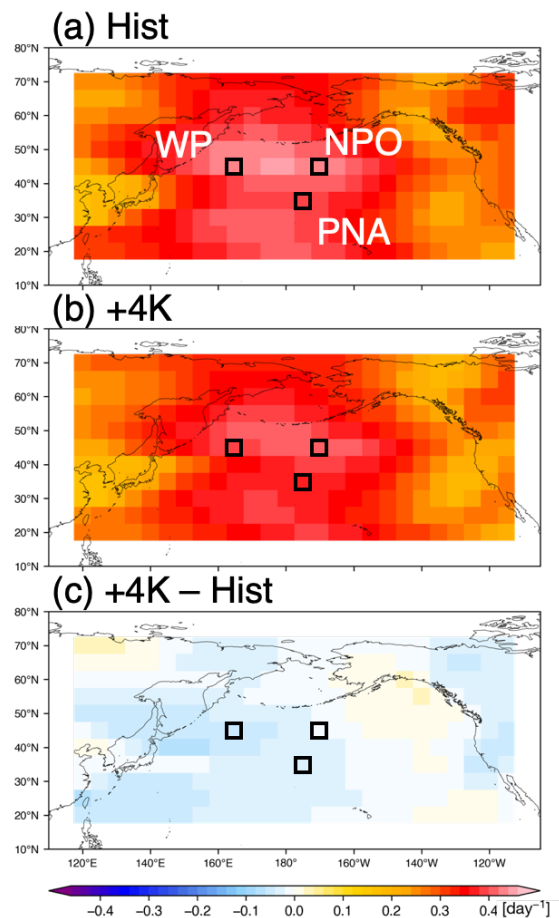


図 2. (a, b) d4PDF (a) 過去実験, (b) 4 度温暖化実験の内部変動から抽出した 286 の回帰偏差パターンに対して評価した, 北半球対流圏 (10-85°N, 地表-100 hPa) で評価された正味エネルギー変換効率 (CK+CP+CK_{HF}+CP_{HF})。それぞれの循環偏差の抽出に用いた各 500hPa 東西風の参照点の位置に示している。(c) (b)と(a)の差。WP パターン, NPO, PNA パターンに対応する参照点の位置を四角で示す。循環偏差場がエネルギーを獲得する時, エネルギー変換効率が正。

減がパターンによって異なることが分かった (図 1c)。全エネルギーの変化はパターンの南北位置に強く依存し, 特に, PNA パターンを含む 35°N に節を持つパターンのエネルギーは増加, WP パターンや NPO を含む 45°N に節を持つパターンのエネルギーは減少する。高度ごとに見てみると, KE は全パターンごとに対流圏に渡

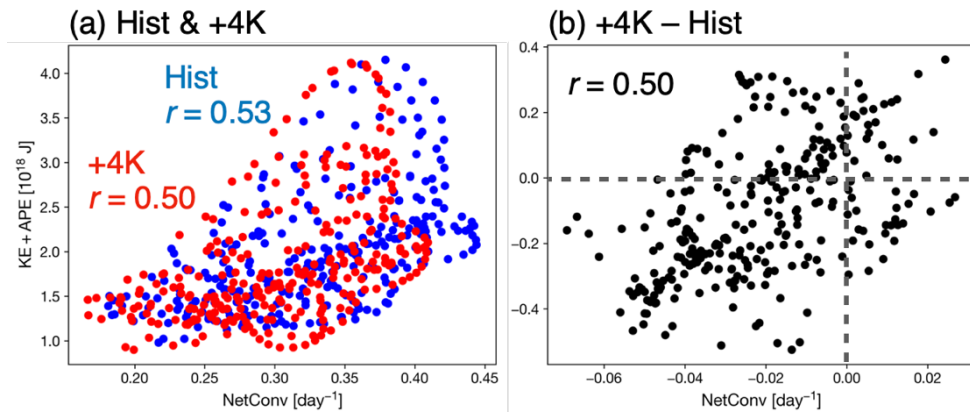


図3.(a) d4PDF 過去実験, 4度温暖化実験から抽出された286の回帰偏差パターンそれぞれに対して評価された, 正味エネルギー変換効率 ($CK + CP + CK_{HF} + CP_{HF}$) と全エネルギー ($KE + APE$) の散布図。それぞれ青, 赤の点群で示されており, 相関係数はそれぞれ0.53, 0.50である。(b) 正味エネルギー変換効率, 全エネルギーそれぞれの, 4度温暖化実験と過去実験の差。同じ参照点の500hPa東西風偏差に対して回帰されたパターン同士の比較に基づく。

って一貫した変化を示したのに対し, APEは全パターンを通じて対流圏下層で減少, 対流圏上層で増加する傾向があった。

4. エネルギー論的考察

得られた偏差場に基づき, 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 $CK_{HF} + CP_{HF}$ を評価した[1]。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。その逆数は, 特定の変換過程によって偏差場の全エネルギーを賄うのに要する日数を表す。

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)。過去実験における正味変換効率は, 海盆上で高く, 大陸上で低くなる分布を示している(図2a)。北太平洋中央部の亜寒帯, 亜熱帯領域に2つの極大があり, 前者はWPパターンやNPOに対応し, 後者もPNA

パターンに似た構造を持つパターンに対応する。この結果は, よく知られたテレコネクションパターンやそれに似た構造を持つ循環偏差パターンが, 他のパターン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。各項に分解すると, ほぼすべてのパターンに対して傾圧エネルギー変換が最も高効率に寄与していた(図略)。また, 正味変換効率の空間分布に対しては, CK , CP , $CK_{HF} + CP_{HF}$ それぞれが同程度に寄与していることが分かった(図略)。

正味変換効率の分布は, 全エネルギー分布(図1a)を想起させる。実際, 両者の散布図から, 循環偏差パターンの間で0.53という高い相関を持っていることがわかった(図3a; 青点)。このことから, 正味変換効率が偏差パターンの卓越性を決める重要な因子であることが示唆される。

温暖化実験において, 正味変換効率は過去実験のものと似た分布を示すが, 全体的に効率が下がっている傾向がある(図2b)。また, 傾圧エネルギー変換が最も高効率な維持過程であることや, 正味変換効率分布に CK , CP , $CK_{HF} + CP_{HF}$

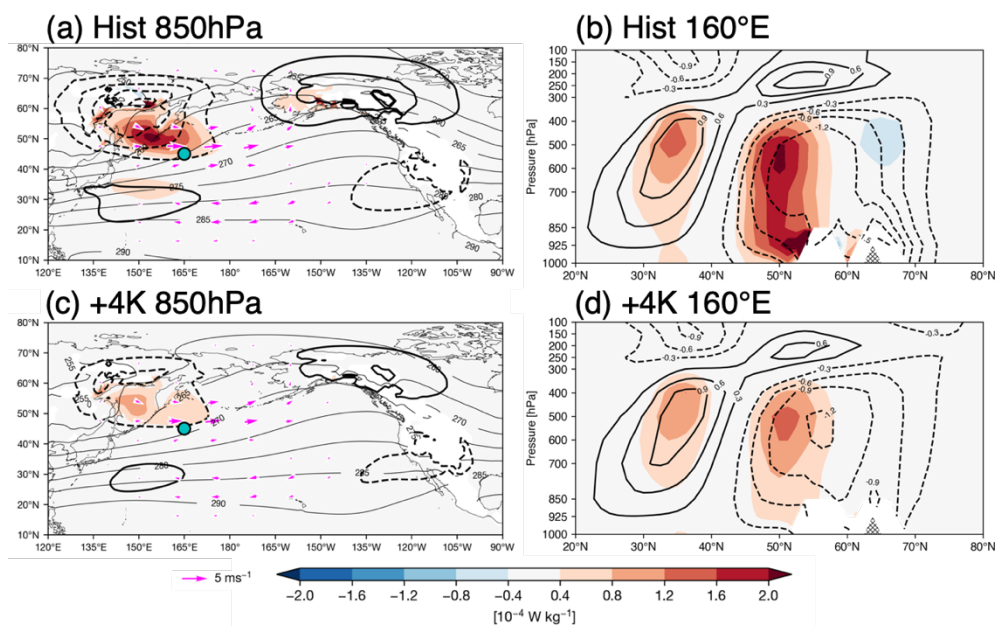


図 4. (a, c) d4PDF (a) 過去実験, (c) 4 度温暖化実験から抽出された WP パターンそれぞれに対して評価された, 850hPa における傾圧エネルギー変換 CP(陰影)。太い等値線, 矢印はそれぞれ WP パターンに伴う 850hPa 気温偏差 (0.5K 毎, 破線は負値, 0 K は省略), 風速偏差を表す。また, 同気圧面における気候平均気温場を太い等値線で表す。(b, d) (a), (c) と同様。ただし, 160°E における子午面断面を示しており, 等値線は気温偏差 (0.3K 毎)。

それぞれが寄与している点も同様であった。正味変換効率と全エネルギーの散布図はやはり高い相関を示しており (図 3a; 赤点), 温暖化した気候においても, 正味変換効率が卓越性を決める因子であることが示唆される。

現在気候と温暖化した気候の差に注目すると, エネルギーが増加するパターンほど, 正味エネルギー変換も高効率になることが分かった (図 3b)。この結果は, 温暖化に伴う各テレコネクションパターンの変調に対してエネルギー論的説明を与える。

傾圧エネルギー変換は, 北太平洋ジェットの北/南に節が来る南北テレコネクションに対して増加/減少していた。これには平均場だけでなく偏差場の構造の変化も効率の低下に寄与していることが分かっており (図略), さらなる調査が必要である。

傾圧エネルギー変換効率は, 全パターンで減

少する (図略)。これには, 気候平均場, 循環偏差場の変化の両者が寄与していた。ここでは一例として, WP パターンの鉛直構造に着目する (図 4)。現在気候における WP パターンは, オホーツク海周辺における気候平均気温勾配を緩和するように熱を輸送することによって対流圏中下層で APE を獲得するが (図 4a, b), 将来気候においては対流圏下層の気温偏差が中層に比べて相対的に弱まり, 背景場がより傾圧的である下層において効率的に APE を獲得できなくなる (図 4c, d)。また, 同領域における東西方向の気候平均気温勾配の弱化も, 効率低下に寄与していた (図略)。

参考文献

- [1] Tanaka, S., et al., 2016, *J. Climate*, **29**, 6597-6616
- [2] Kim, M., et al., 2021, *J. Climate*, **34**, 1847-1861
- [3] Mizuta, R., et al., 2017, *BAMS*, **98**, 1383-1398