

夏季のユーラシア大陸上の極前線ジェットに沿う東西テレコネクションの地球温暖化に伴う変調

坂井彩織、小坂優（東京大学先端科学技術研究センター）

1. はじめに

夏季のユーラシア大陸北部には、北極海と
の間の南北気温勾配に伴う極前線ジェット
(PFJ) が存在する。PFJ 上には、ロスビー波
に対する導波管効果により、東西波列状のテ
レコネクション (PFJ テレコネクション) が
見られ、夏季の東アジアの天候に影響を与え
る。PFJ テレコネクションの力学的特性や、
近年日本で頻発する猛暑等の夏季天候変動
に対する役割は十分に明らかになっていない。
また温暖化に伴いこのテレコネクション
がどのように変調するかも不明である。そこ
で本研究は、現在気候における PFJ テレコネ
クションの力学特性や各地の気候への影響
を調べ、さらに地球温暖化に伴う変調を調査
した。

2. データ・解析手法

現在気候の観測データとして全球長期大気
再解析データセット ERA5 を使用した。また
現在気候における PFJ テレコネクションの
力学特性及びその温暖化に伴う変調を調査
するため、大規模アンサンブル全球大気モデ
ルシミュレーションデータセット d4PDF の
過去実験と 4°C 温暖化実験の 2 種類のデー
タを使用した。いずれも 1959 年から 2011 年
間の夏季 (6 月～8 月) の経年変動を解析し
た。PFJ テレコネクションの抽出は、250hPa
南北風の気候学的分散の極大域を含む 50°N
– 80°N, 0° – 150°E における経験直交関数
(EOF) 解析により行った。夏季平均に加え、
PFJ テレコネクションがもたらす影響の季節
変調に関する解析など、一部にはカレンダー

月毎の解析も行った。d4PDF では全メンバ
ーをつなげた変動に対し EOF 解析を行なっ
た。

3. 夏季平均場におけるテレコネクション

夏季平均場での EOF 解析によって得られ
た第 1・第 2 モード (EOF1 および EOF2) は
いずれも、波数およそ 4 で北大西洋からシベ
リアを通して極東・北太平洋へと東西に連な
る波列パターンで特徴付けられ、EOF1 と
EOF2 は東西に直交する波列パターンとなっ
ており (図 1a, b)、Xu et al. (2019, 2022) と整
合する。また ERA5 では EOF1 と EOF2 の寄
与率はそれぞれ 26.3%、21.5% で、両者は互
いに十分に分離するとはいえない。また
d4PDF 過去実験でも寄与率は 23.9%、21.8%
と差は大きくない。また d4PDF 過去実験の
アンサンブルメンバー毎に得られた EOF1 と
EOF2 の東西位相は大きくばらつくことから、
PFJ テレコネクションにおいて特定の東西位
相の卓越性は顕著ではないと考えられる。そ
こで EOF1 と EOF2 の両方を解析に用いるこ
とにし、以下それらの線形結合で表されるテ
レコネクションを PFJ テレコネクション呼
ぶ。また d4PDF 過去実験 (図 1a, b) と 4°C
温暖化実験 (図 1c, d) の比較から、温暖化に
伴い PFJ テレコネクションは極向きにシフ
トし、また下流側で強化されることがわかっ
た。前者は PFJ が温暖化に伴い極側へシフト
することと整合している。また d4PDF にお
いてアンサンブル平均の占める分散の割合
は 2% 未満となっており、海面水温変動など
がもたらす潜在的予測可能性は低いことが
示唆された。

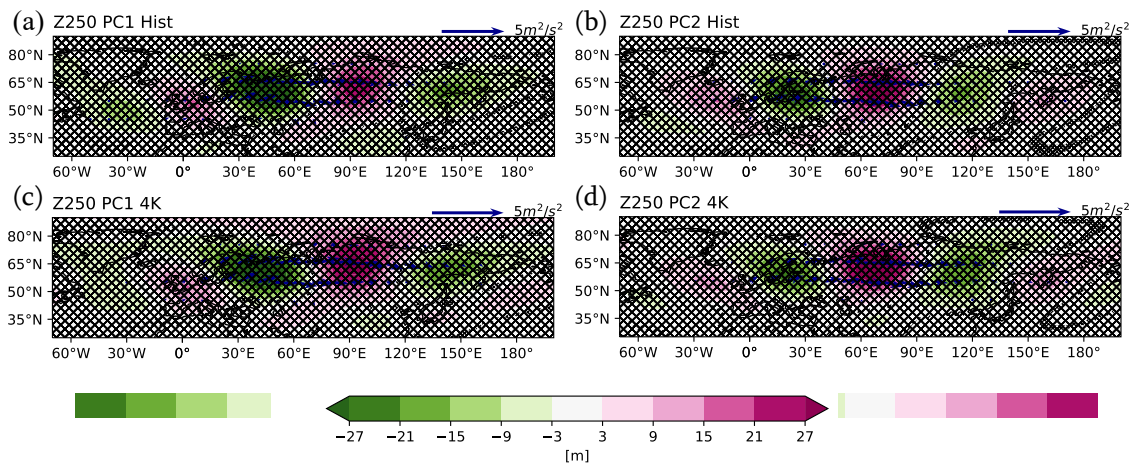


図1 (a) EOF1、(b) EOF2に伴う夏季平均250hPa ジオポテンシャル高度偏差（色）と付随する波活動度フラックス（矢印）。網掛け領域は高度偏差が95%信頼水準を満たさない領域を表す。d4PDF 過去実験に基づく。(c) (a)と同様、(d) (b)と同様、但し d4PDF 4°C 温暖化実験に基づく。

4. テレコネクションのエネルギー論と温暖化に伴う変調

温暖化に伴う気候平均場の変化として、前述の PFJ の極側へのシフトに加え、対流圏界面高度の上昇や PFJ 及び亜熱帯ジェットの高の上昇、対流圏中下層での静的安定度の増加などが見られる。PFJ テレコネクションの振幅の温暖化に伴う変調を評価する上で、このような背景場の変化に伴って偏差の鉛直構造の変化が予想されるため、特定の高度での振幅比較は有効でない。そこで、PFJ テレコネクションに付随する運動エネルギー (KE) と有効位置エネルギー (APE) を指標として、鉛直構造と振幅の変調を調査した。またエネルギー収支解析により、維持メカニズムの変調を調査した。

まず現在気候において、PFJ テレコネクションに伴う KE + APE の北半球中高緯度全域 (20° – 85°N, 地表面 – 85hPa) 積分に対する、順圧エネルギー変換、傾圧エネルギー変換、変調された短周期擾乱活動からのフィード

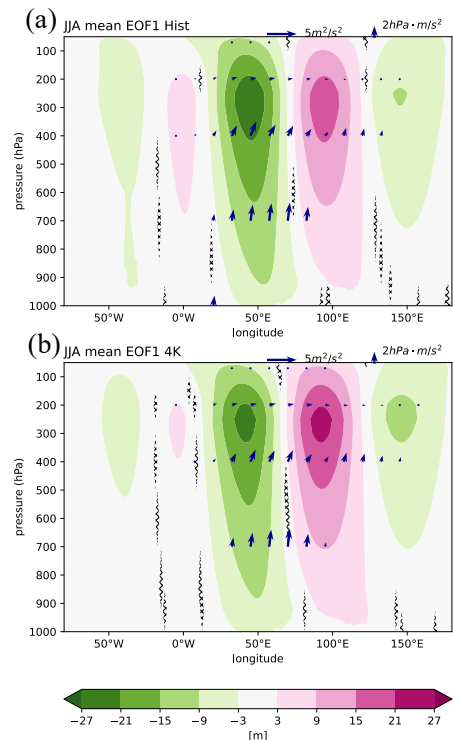


図2 (a) EOF1に伴う50° – 80°N 平均ジオポテンシャル高度回帰偏差（色）と付随する波活動度フラックス（矢印）。過去実験に基づく。(b) (a)と同様、但し温暖化実験に基づく。

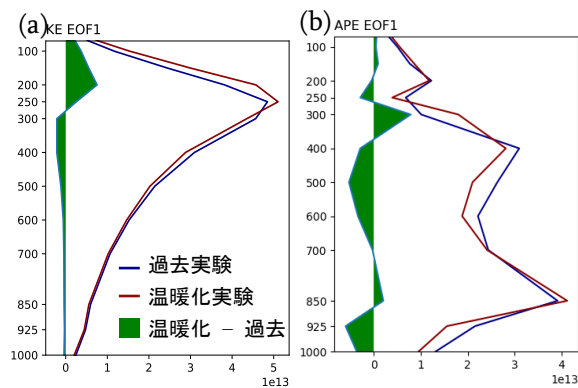


図 3 d4PDF における EOF1 に伴う (a) KE, (b) APE の北半球中高緯度 (20°–85°N) 積算 [$\text{m}^4 \text{s}^{-2}$]. 過去実験は青線、温暖化実験は赤線、それらの差 (温暖化実験 – 過去実験) は緑で示す。EOF2 でも定性的には同様の変化を確認した。

バック強制の影響の寄与を評価した。EOF1・EOF2 いずれにおいても、正味のエネルギー変換は偏差場を維持するように働く。中でも傾圧エネルギー変換が最も寄与する。正の傾圧エネルギー変換は、EOF1・EOF2 が傾圧的な構造を示していることと整合する (図 2a)。順圧エネルギー変換の寄与はわずかで、短周期擾乱からのフィードバックは順圧過程と傾圧過程が相殺し正味では小さいことがわかった。

次に、温暖化に伴うエネルギー収支の変化を評価した。温暖化実験では過去実験と比べ、KE は対流圏内で減少し下部成層圏で増加する (図 3a)。APE は対流圏上層では増加し、対流圏中下層で顕著に減少する (図 3b)。このような鉛直構造の変化は、テレコネクションに伴う循環偏差の上向きシフトを意味する。これは PFJ 軸の上昇と対流圏における静的安定度の増加に起因することが考えられる。また北半球中高緯度の積算値では KE + APE は温暖化に伴い減少する。エネルギー変

換効率を評価したところ、温暖化に伴い正味の変換効率は低下することがわかり、これはエネルギーの減少と整合する。温暖化実験でも PFJ テレコネクションは傾圧的な構造を示すものの (図 2b)、正味の変換効率の低下には傾圧エネルギー変換効率の低下が最も重要で、偏差場の構造の変化と背景場の成層度や傾圧性の変化の両方が寄与することが示唆された。

5. オホーツク海高気圧への影響

PFJ テレコネクションの伝播経路の初夏から晩夏への変化に応じて、地表付近へもたらす影響も季節間で変調する。そこで 6~8 月のカレンダー月毎の PFJ テレコネクションを同様の EOF 解析により再解析データを用いて抽出した。さらにそのオホーツク海高気圧との関係に着目し、大気循環や天候への影響を解析した。PFJ テレコネクションの任意の東西位相を表すために、EOF1 と EOF2 の線形結合を用いて解析を行った。オホーツク海高気圧指数 (オホーツク海上の 50°N – 60°N, 140°E – 160°E で平均した海面気圧) と PFJ テレコネクションの相関はいずれの月においても、EOF1 と EOF2 の中間の東西位相で最大となり、信頼水準 99% を満たす。一方で、夏季平均の PFJ テレコネクションとはどの位相でも相関は有意でない。

最大相関となる東西位相において、6, 7 月は北欧・東欧からウラル山脈付近までの領域とロシア極東域にブロッキング高気圧頻度の増加が見られ、このことは Nakamura and Fukamachi (2004) で示唆されたオホーツク海高気圧形成メカニズムと整合する。またオホーツク海上には孤立した高気圧偏差が見られる (図 4a, b)。一方で 8 月はオホーツク海

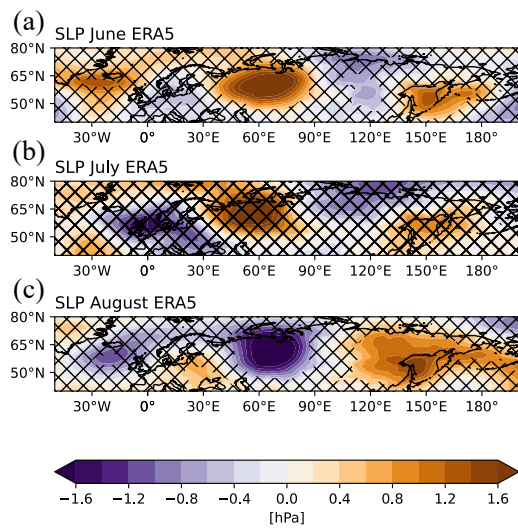


図4 各カレンダー月毎のオホーツク海高気圧指数との相関が最大となる位相における PFJ テレコネクションに伴う SLP 回帰偏差。網掛け領域は 95%信頼水準を満たさない領域を表す。(a)6月、(b)7月、(c)8月。ERA5 に基づく。

周辺の高気圧偏差は東シベリアからベーリング海までに広がり（図5c）、PFJ テレコネクションの東西位相も6,7月とは大きく異なっていて、メカニズムが異なる可能性が示唆された。

また d4PDF を用いて同様の解析を行ったところ、過去実験において、ERA5 とは異なり 8 月でもオホーツク海高気圧との関連が明瞭であった。さらに温暖化に伴う変化として、晩夏（特に 8 月）の PFJ テレコネクションからオホーツク海高気圧への影響が強化されることが示唆された。このことは、温暖化に伴って PFJ テレコネクションの循環偏差がより下流側で強くなることと整合している一方、対流圏での弱化とは反する傾向にあり、さらなる解析が必要である。

6. まとめと議論

本研究は、PFJ テレコネクションには特定の東西位相の卓越が明瞭ではないこと、また PFJ テレコネクションの影響を調査する上で任意の東西位相を考慮することの重要性を示した。温暖化に伴う PFJ テレコネクションの構造の南北・鉛直方向における変化は、PFJ の変化と整合していた。また北半球中高緯度の積算値では PFJ テレコネクションのエネルギーは減少し、傾圧エネルギー変換効率の低下による寄与が示唆された。

今後の課題として、温暖化に伴う PFJ テレコネクションの下流側での強化について、領域を限定しエネルギー論的に考察することや、より高解像の気温・降水データや結合モデルを用いた解析から、気候影響の詳細な定量化やメカニズム、海洋との相互作用、温暖化に伴う変調を調査することなどが挙げられる。

7. 引用文献

- Nakamura, H. and Fukamachi, T. (2004), Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 1213-1233.
- Xu, P., L. Wang, and W. Chen (2019) The British–Baikal Corridor: A Teleconnection Pattern along the Summertime Polar Front Jet over Eurasia. *J. Climate*, **32**, 877–896.
- Xu, P., Wang, L., Dong, Z., Li, Y., Shen, X., & Chen, W. (2022). The British–Okhotsk Corridor pattern and its linkage to the Silk Road pattern. *J. Climate*, **35**, 5787-5804.