

北太平洋十年規模気候変動の長期変調

宮坂貴文・中村 尚（東大・先端研）・田口文明・野中正見（海洋研究開発機構）

1. はじめに

北太平洋海面水温（SST）に見られる十年規模変動は、亜寒帯海洋フロント域と亜熱帯海洋フロント域に沿った領域で顕著である。そして、あらかじめ短周期変動を除去した冬季中緯度海面水温に経験直交関数（EOF）解析を行うと、上記2つの海洋フロント域の変動は独立なモードとして抽出される（Nakamura et al. 1997）。第1モードとして現れる亜寒帯フロント域 SST 変動は、アリューシャン低気圧の変動を伴う点で太平洋十年規模振動（PDO; Mantua et al. 1997）的だが、熱帯 SST と同時相関が無い点で PDO とは異なる。むしろ、第2モードとして現れる亜熱帯フロント域 SST 変動が熱帯 SST 変動との間に有意な相関を示す。この変動は亜熱帯高気圧の変動を伴っており、北太平洋ジャイア振動（NPGO; Di Lorenzo et al. 2008）的である。

最近、北太平洋 SST に対する EOF 解析により得られる卓越変動モードの振幅が長期的に変調していることや（Yeh et al. 2011）、エル・ニーニョ／南方振動（ENSO）の挙動に変化が見られることが指摘され始めた（Yeh et al. 2009）。そこで本研究では、北太平洋の SST と大気循環場に見られる十年規模変動の長期変調を、卓越変動モードの変化という観点から、再解析データに基づいて調べた。さらに、類似の変調が大気海洋結合モデル（CGCM）実験において現れ得ることが分かったので、その結果についても報告する。

2. データと手法

用いたデータは NCEP/NCAR 再解析データ（Kalnay et al. 1996）である。ENSO からの遠隔影響などによる経年変動を除去するため、あらかじめ3年移動平均を施した冬季平均場（12～2月）を解析対象とし、1948/49～2010/11年について解析した。

卓越変動を抽出するため、中緯度 SST に対して EOF 解析を対して行い、その主成分時系列に対する線形回帰関を SST および大気循環場について作成した。

大気海洋結合モデルは海洋研究開発機構の CFES を用いた。解像度は大気部分が T119L48 で、海洋部分が 0.5 度緯度経度格子で、54 鉛直層であり、北西太平洋の海洋フロント帯の存在を表現できる。150 年積分結果を用い、中緯度 SST に対する EOF 解析を行った。

3. 十年規模変動の長期変調

3年移動平均をかけて ENSO などの短周期変動を除去した冬季 SST の変動振幅は SST 南北勾配が大きい海洋フロント域で大きいものの、その振幅は解析期間を通して一定ではなく、長期変調している（図1）。1980年代までは亜寒帯フロント域での変動が顕著であったが、それ以降は亜熱帯フロント域での変動の方が卓越するようになった。そして、この亜熱帯フロント域の SST 変動は、全体的な温暖化傾向が重なってはいるものの、熱帯 SST と負相関を示していることが分かる。こうした負相関が亜寒帯フロント域 SST と熱帯 SST との間には見られなかった。

十年規模変動の変調を空間的に捉えるた

めに、解析期間を5年ずつずらした20年標準偏差の変遷を調べた(図2)。亜寒帯フロント域のSST変動は、あまり位置を変えずに振幅を変化させており、1960年代~1970年代の変動が弱かった時期の後、1980年代に強化が見られたが、近年はまた弱体化している。一方、亜熱帯フロント域SSTは、振幅だけでなく、変動の作用中心位置が変わっており、1980年代までは亜熱帯フロント東部域の方が変動が大きかったのに対し(図2d,e)、1990年代以降は亜熱帯フロント西部域の変動の方が顕著である(図2h,i)。なお、この変動作用中心の西への移動と熱帯SSTの変動作用中心の西

へ移動は整合的である。

亜寒帯フロント域および亜熱帯フロント域でのSST変動の長期変動は、領域平均したSSTに対するウェーブレット解析で明瞭に見ることができる(図3)。亜寒帯フロント域の十年規模変動は1980年代が特に強かったのに対し、亜熱帯フロント西部は1990年代になって強くなる様子が確認できる(図3a,c)。中央熱帯太平洋域が亜熱帯フロント西部と同様に1990年代になって強まる様子も確認できる(図3e)。なお、PDOインデックスやNINO3は亜寒帯フロントSSTと比較的近い周期や時期に変動振幅が大きくなってはいるものの、ややずれていることが分かった(図3a,b,f)。

北太平洋の十年規模変動の変調を卓越変動モードの変化という観点から調べるため、解析期間20年のEOF解析を異なる期間に対して行い、比較した。1973~1992年(図4)と1985~2004年(図5)の二つの期間に対する結果を比較する。なお前者の期間はNakamura et al. (1997)における解析期

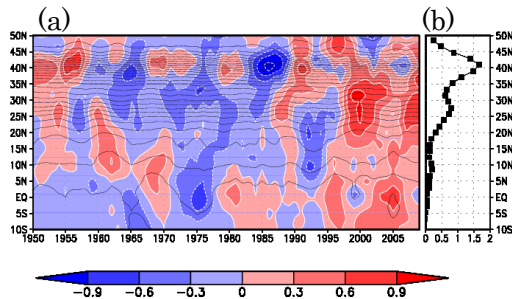


図1: (a) 3年移動平均したSST(黒線、0.3K毎)とその気候値からの偏差(色)。(b) 気候平均SSTの南北勾配(K/110km)。

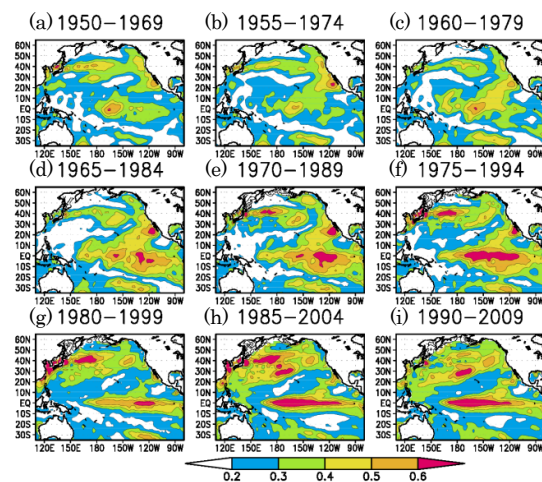


図2: 3年移動平均した冬季SSTの20年標準偏差(単位はK)。解析期間を5年ずつずらしている。

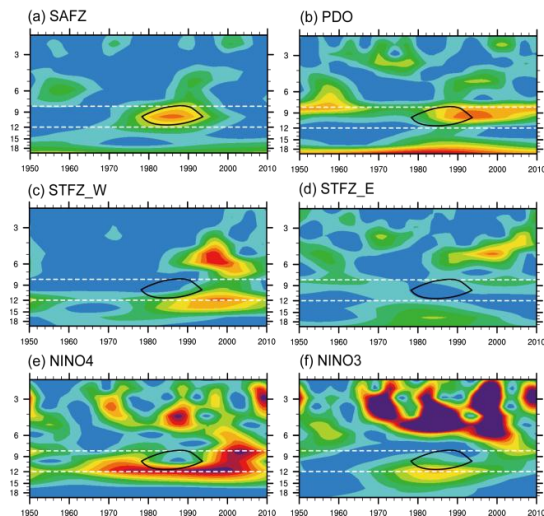


図3: 冬季平均時系列に対するウェーブレット解析。(a) 亜寒帯フロント域SST、(b) PDOインデックス、(c) 亜熱帯フロント西部SST、(d) 亜熱帯フロント東部SST、(e) NINO4域SST、(f) NINO3域SST。

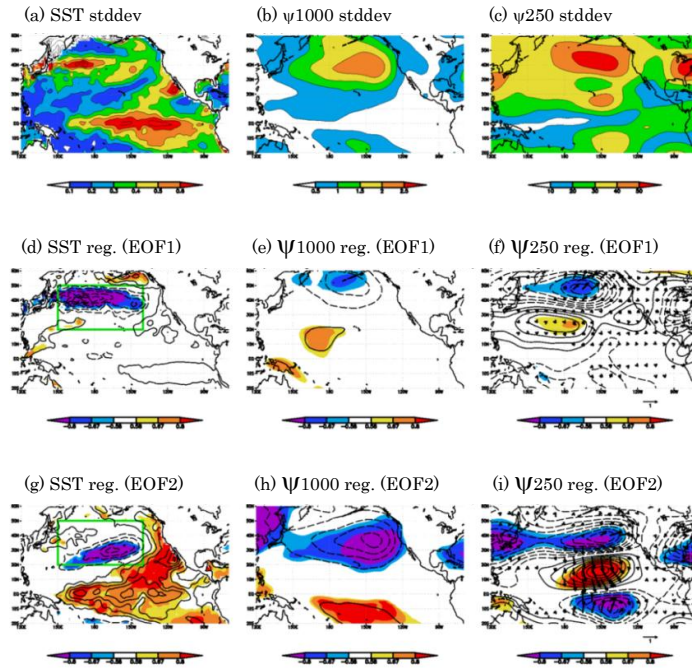


図 4 : NCEP/NCAR 再解析に基づく 1973~1992 年の(a-c) 20 年標準偏差と (d-f) 中緯度 SST に対する EOF 解析の第 1 モード主成分時系列に対する線形回帰、(g-i)は第 2 モードに対する線形回帰。いずれも解析前に冬季平均に 3 年移動平均を施してある。(c-i)の色は有意水準 90、95、99%の領域を示す。(a,d,g) は SST、(b, e, h)は 1000hPa 流線関数、(c,f,i) は 250hPa 流線関数とそれに対する波活動度フラックス (Takaya and Nakamura 2001) を図示。

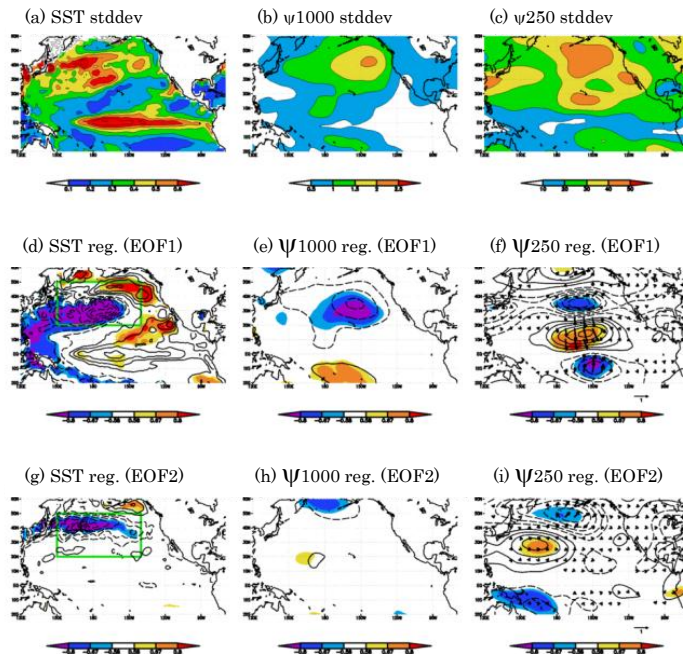


図 5 : 図 4 と同じ。但し、解析期間は 1985~2004 年。

間にほぼ対応している。この期間は亜寒帯海洋フロント域の変動が中緯度 SST に対する EOF1 として現れ (図 4d)、この変動はアリューシャン低気圧の変動を伴い、その上空に太平洋・北米 (PNA) パターン的な循環変動を伴う (図 4e,f)。さらに、熱帯 SST との有意な同時相関は見られない。一方、EOF2 には亜熱帯フロント域の SST 変動が現れ、熱帯 SST との有意な相関を示すとともに、亜熱帯高気圧の変動を伴う。これらは Nakamura et al. (1997) で指摘された通りである。

解析期間を 1985~2004 年にして同様の解析をすると、亜寒帯フロント域の変動は EOF1 ではなく EOF2 として現れるようになり、亜寒帯海洋フロント域の変動の卓越性が失われたことが分かる (図 5g)。代わって、亜熱帯フロント域の変動の卓越性が増し、EOF1 として現れる (図 5d)。但し、変動の作用中心は 1973~1992 年の場合と比べて西へと移っていることが分かる。変動の変調は大気下層の循環変動にも見られ、付随する亜熱帯高気圧変動の空間スケールに変化が見られた (図 4h, 5e)。なお、大気下層の循環変動の変調は亜寒帯フロント SST 変動に付随する変動にも見られ、近年はアリューシャン低気圧変動の振幅が弱まり、やや北側へシフトしているとともに (図 4e, 5h)、PNA 的波列が弱化していた。

なお、再解析データから示唆される十年規模変動の長期変調に類似の変調が CGCM を用いた実験にも現れ得ることが、CFES の 150 年積分実験から分かった (図 6)。EOF1、EOF2 として亜寒帯フロント域、亜熱帯フロント域の SST 変動が抽出され (図 6d,g)、その主成分時系列の 20 年移動分散は、積分開始 75 年あたりで逆転し、卓越変動モードが入れ替わったことを示している (図 6j)。なお、亜寒帯フロント域および亜熱帯フロント域の SST 変動に付随する大気循環変動パターンも再解析データから示されるものと対応しており、CFES 内の十年規模変動が現実的であると考えられる。CFES を用いた実験における十年規模変動の長期変調の存在は、再解析データから示唆される十年規模変動の長期変調の存在を支持する結果であると考えられる。

4. まとめ

NCEP/NCAR 再解析データに基づいて北太平洋の SST および大気循環場に見られる十年規模変動の長期変調を調べた。アリューシャン低気圧および上空の PNA 的な循環変動を伴う亜寒帯フロント域の SST 変動は 1980 年代に卓越し、その後は弱化する傾向にあることが分かった。一方、亜熱帯フロント域の変動は、その西部において 1990 年代以降卓越し、亜寒帯フロント域の変動よりも顕著になった。SST 変動に付随する大気循環変動にも変調は見られ、亜熱帯フロント域 SST 変動に付随する亜熱帯高気圧変動の空間スケールの変化や、亜寒帯フロント域 SST 変動に伴うアリューシャン低気圧変動の弱化が見られた。

なお、CFES を用いた CGCM 実験においても同様の変動が卓越し、かつそれらの卓越性の変化が確認できた。また、他の SST データ (COBE, HadISST, ERSST, ICOADS) においても整合的な結果が得ることが確認できることから、これらの結果は再解析データから示唆される十年規模変動の長期変調が実在のものであることを支持していると考えられる。

参考文献

- Di Lorenzo, E., N. Schneider, K. M. Cobb, P. J. S. Franks, K. Chhak, A. J. Miller, J. C. McWilliams, S. J. Bogard, H. Arango, E. Curchitser, T. M. Powell, and P. Riviere, 2008: North Pacific gyre oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08607.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **77**, 437-471.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallae, and R. C. Francis, 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation

- with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **73**, 1069-1079.
- Nakamura, H., G. Lin, and T. Yamagata, 1997: Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **78**, 2215-2225.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- Yeh, S.-W., J.S. Kug, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. P. Kirtman, and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate. *Nature*, **461**, 511-514.
- Yeh, S.-W., Y.-J. Kang, Y. Noh, and A. J. Miller, 2011: The North Pacific climate transitions of the winters of 1976/77 and 1988/89. *J. Climate*, **24**, 1170-1183.

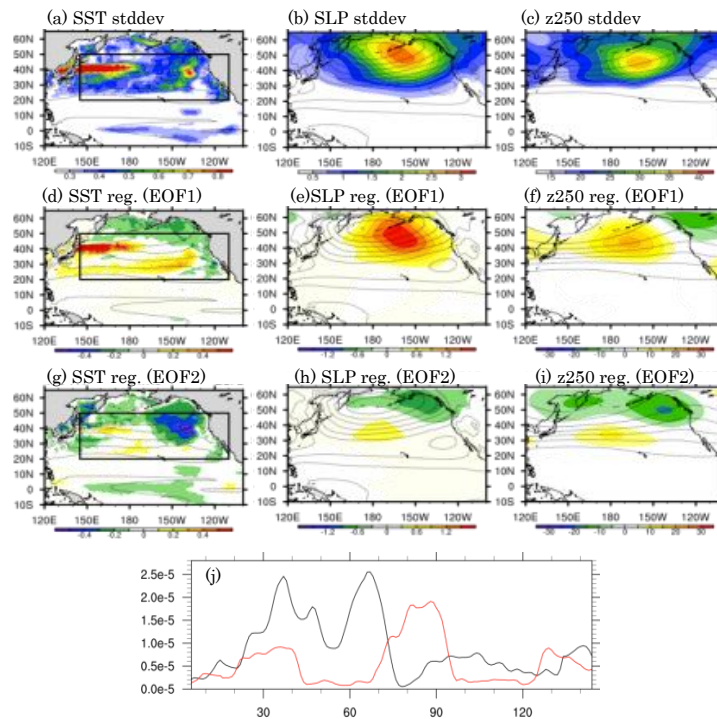


図 6 : 大気海洋結合モデル CFES の 150 年積分に基づく (a-c) 標準偏差と (d-i) 中緯度 SST に対する EOF 解析の第 1 モード主成分時系列に対する線形回帰。(g-i) は第 2 モードに対する線形回帰。(a,d,g) は SST、(b, e, h) は海面気圧、(c,f,i) は 250hPa 高度場。(j) 主成分時系列の 20 年移動分散。黒線が第 1 モード、赤線が第 2 モード。