

北太平洋にみられる十年規模の海洋変動の診断

成井昭夫（気象庁気候情報課）・福田義和（気象庁海洋気象課）

1. はじめに

1970年代半ばに北太平洋の海洋と大気の気候状態が大きく変化したことが1980年代に入り相次いで報告された。Nitta and Yamada (1989) やTrenberth (1990) は1977年以降北太平洋中央部の海面水温が広範囲に低下しており、その原因を太平洋熱帯域の海面水温の上昇と関連付けて論じた。その後、これらの研究がきっかけとなり、太平洋の大気海洋の長期変動の研究が盛んになった。その結果、1976/77年以外にも北太平洋中高緯度で大きく海面水温が変化した時期があることや、その空間的な分布の特徴及び大気変動との関連が明らかにされた。Mantua et al. (1997) は、北太平洋の海面水温を主成分分析し、第1主成分に現れる変動を太平洋十年規模振動（PDO: Pacific Decadal Oscillation）と名付け、その時係数をPDO指数とした。PDO指数が正のときには北太平洋中央部の海面水温が低下し、アラスカ湾からカリフォルニア沖の北米大陸沿岸で海面水温が上昇する。PDO指数は1925年に上昇、1947年に下降、1977年に上昇しており、1977年の変動はPDOの変動としてみることができると指摘した。

また、北太平洋にみられる十年規模の海洋変動には第1主成分で説明されるPDOだけでなく、第2主成分との関連も報告されている。Bond et al. (2003) は、最近の変動はPDOだけではうまく説明できず、北緯40度を境として南北で逆符号に変動する第2主成分も考慮すべきと指摘している。

海面水温は大気の短い時間スケールの変動の影響を受けやすいが、表層水温は、その影響が小さいため時間スケールの長い大気の変動の影響を検出しやすい。このため十年規模といった長い時間スケールの変動を調べるに

は表層水温が有効である。表層水温や表層貯熱量についても長周期変動の研究が行われ、海洋内部にも十年規模の変動が見出されている（Luo and Yamagata, 2001など）。

これらの知見を踏まえ、主成分分析を利用して北太平洋にみられる十年規模の海洋変動の様子を調べた。

2. データ

気象庁では、気候解析を目的として、100年以上にわたる全球月平均海面水温格子点データセット（COBE-SST）を整備している（Ishii et al., 2005）。海面水温の変動の解析には1901～2012年のCOBE-SSTを用いた。大気のパラメータとしては、JRA-25長期再解析データ（Onogi et al., 2007）を使用した。

また、気象庁では、観測船、一般船舶、中層フロート、定置ブイなどによる現場観測データをもとに、Ishii and Kimoto (2009) の手法に従い、1950年以降の海面から深さ700mまでの水温の月平均格子点データセットを作成している。海面から深さ700mの平均水温を用いて表層水温の変動を解析した。

3. 海面水温の変動

北太平洋中高緯度の海面水温変動の特徴を調べるため、北緯20度以北の月別海面水温偏差格子点データ（1901年～2000年の100年平均した月ごとの平年値をもとに、月ごとに各格子点で平年差を算出し、更に地球温暖化によるトレンドを取り除くため、各月の全球平均平年差を引いた値）を用いて主成分分析を行い、海面水温変動のなかで寄与の大きい第1主成分(PDO: 寄与率21.3%) と第2主成分（寄与率10.4%）の時係数を求めた。時係数は標準偏差で規格化してある。図1は第1、2

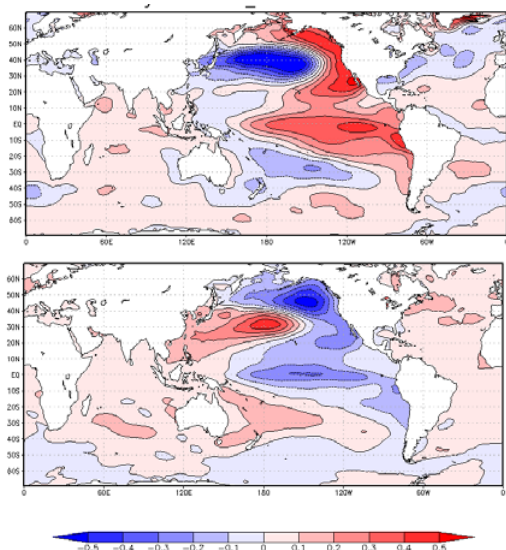


図1 1901年～2000年の北太平洋の月別海面水温偏差の主成分分析によって得られた第1主成分（上）、第2主成分（下）の時係数と海面水温偏差の回帰係数。

主成分の時係数と全球の海面水温偏差（平年値は1981年～2010年の30年平均）との回帰係数、図2は第1、第2主成分の時係数の冬季平均の時系列である。第1主成分は北太平洋中央部で負、アラスカ湾からカリフォルニア沖にかけての北米大陸沿岸部で正となっているのが特徴的である。また、日付変更線より東の太平洋赤道域で正となっている。第2主成分は北緯40度を境に北で負、南で正と逆符号に分布しており、Bond et al.(2003)で示された第2主成分と同じ変動が現れていると考え

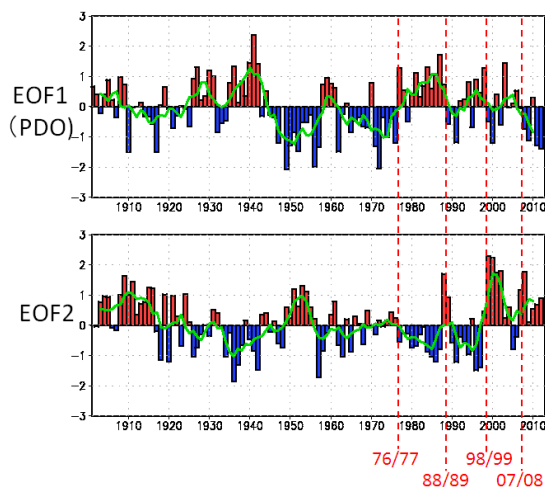


図2 北太平洋の海面水温偏差の第1主成分（上）、第2主成分（下）の時係数の冬季平均（12月～2月）

られる。

最近数十年の間には、北太平洋では1976/77年、1988/89年、1998/99年に大きな気候変化があったといわれている。図3(a)～(c)は1976/77年、1988/89年、1998/99年を境とした前後10年間平均の冬季（12～2月）の海面水温の差であり、変化前後の10年規模の変化を表す。

1976/77年に北太平洋中央部を中心に広い範囲で海面水温が低下したのに伴い、PDO

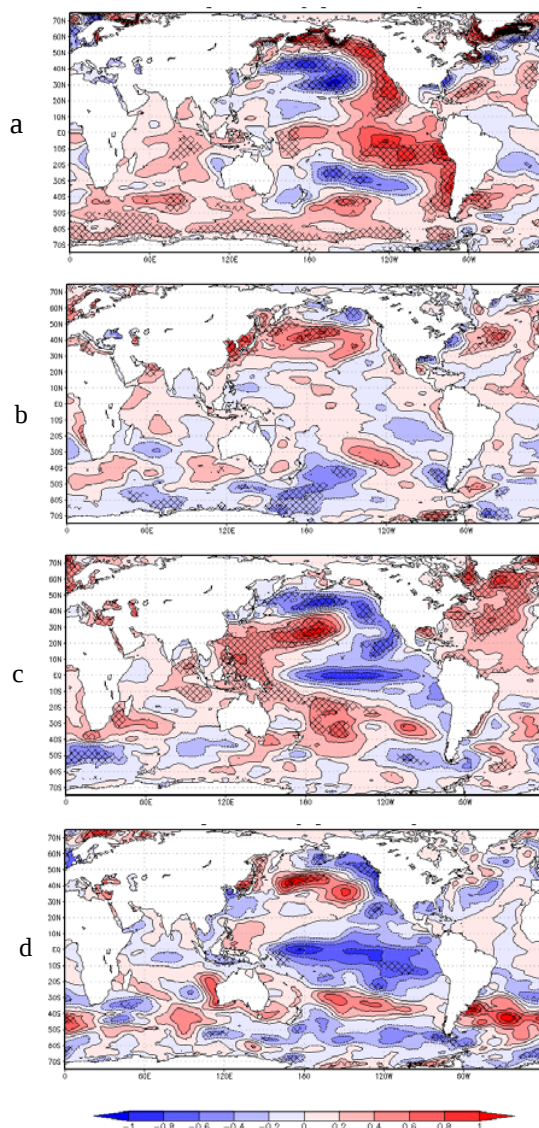


図3 北太平洋における1976/77年、1988/89年、1998/99年、2007/08年を境とした前後10年間平均の冬季（12～2月）の海面水温の変化（単位：℃）。ハッチは両側95%で有意な差であることを示す。

指数は、10年程度続いた負の状態からその後10年以上続く正の状態に大きく変化した。1976/77年の前後10年間平均の海面水温の有意な差は、北太平洋中央部の北緯40度付近を中心に広い範囲で負、東部の北米大陸沿岸域で正、日付変更線より東の太平洋赤道域全域で正である（図3a）。この10年間平均の海面水温の差はPDOが正の時の空間パターンとよく似ている。1976/77年前後の変化は、PDOの符号変化に表れる十年規模変動であった。

1988/89年に北緯40度付近を中心に海面水温が広範囲に上昇したのに伴い、PDO指数は10年程度続いた正の状態から負の状態に大きく変化した。負の状態は3年程度で解消した。1988/89年前後10年間平均の海面水温の有意な差は、北緯40度付近の比較的狭い範囲で正であり、東部の北米大陸沿岸域や赤道域では有意な差はみられない（図3b）。この差はPDOが正のときにみられる空間パターンと北緯40度付近以外は似ていない。特に赤道域で有意な差がみられず、1976/77年とは異なることがわかる。図4は、1988/89年の前9年間と後10年間の平均500hPa高度平年差の冬季平均の差である（JRA-25長期再解析データは1979年1月からの解析で1978年12月の解析値がないため1980年冬からの平均値を用いている）。1988/89年前後では、500hPa高度は北極付近で負側に变化する一方、中緯度帯では帯状に正側に变化し、これは極域に寒気が蓄積される正の北極振動的な状況への変化を示している。これらのことから、1988/89年の

変化は、北極振動に関連した主に中緯度以北で起こった一時的な変動であったと考えられる。

1998/99年に北緯40度付近を中心とした海面水温が上昇したのに伴い、PDO指数は、5年程度続いた正の状態から負の状態に変わり、その後数年程度で負の状態は一旦解消したが、再び2007年から現在（2012年）まで負の状態が続いている。1998/99年の前後10年間平均の海面水温の有意な差は、北緯40度を境に北側で広範囲に負、南側で広範囲に正である（図3c）。この差は第2主成分の空間パターン（図1下図）とよく似ている。第2主成分の時係数が10年程度続いた負の状態から10年以上続く正の状態に大きく変わったためである（図2下図）。図5は、前後10年間の平均海面気圧平年差の冬季平均の差である。この差は北緯40度付近を境に南北逆符号のNPO的な構造であり、NPOは第2主成分の形成要因と考えられている（Di Lorenzo et al., 2008）。これらのことから、1998/99年前後の変化は、北緯40度を境に北側で負偏差、南側の北緯30度付近で正偏差の対で特徴付けられる第2主成分が大きく関わった十年規模の変化であったと考えられる。

なお、2007/08年に北緯40度付近を中心に海面水温が上昇したのに伴い、PDO指数は、その後2010年を除いて負の値が続いている。2007/08年の後5年間と前10年間平均の海面水温の有意な差（図3d）は、北太平洋中央部の

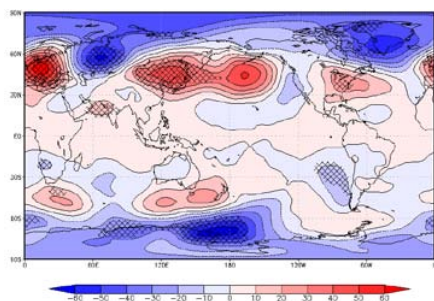


図4 1988/89年を境とした冬季平均（12～2月）の500hPa高度の変化（単位：m）。

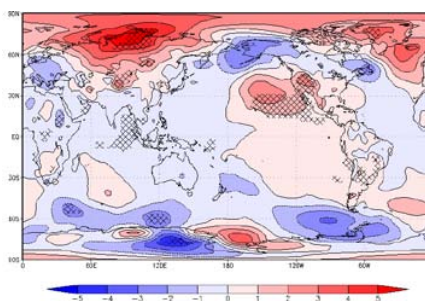


図5 1998/99年を境とした冬季平均（12～2月）の海面気圧の変化（単位：hPa）。

北緯40度付近を中心に正、東部の北米大陸沿岸域で負である。有意ではないが、日付変更線より東の太平洋赤道域で負であり、これはPDOが負の時のパターンに似ている。図6は、2007/08年の前10年間と後5年間の冬季の平均海面気圧平年差の冬季平均の差である。この差はアリューシャン低気圧が弱まったことを示しており、1976/77の変化とは逆の大気の変化となっている。まだ5年程度しか経っていないこともあり、この変動が十年規模変動として持続性があるかどうか、1976/77年の変化と同じような仕組みで説明し得る変化か否か、今後の推移をみて判断する必要がある。

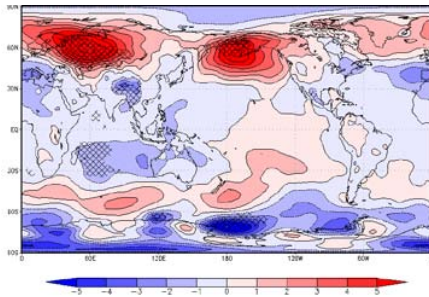


図6 2007/08年を境とした冬季平均（12～2月）の海面気圧の変化（単位：hPa）。

4. 表層水温の変動

海面水温でみられた十年規模の変動が、海洋内部の表層でどのように現れているかを調べるため、海面水温と同様に北緯20度以北の領域で主成分分析を行った。地球温暖化によるトレンドを取り除くため各格子点の値から全球の平均値を引くのも同様に行っている。得られた時係数を図7に示す。第1主成分の寄与率は16.7%、第2主成分の寄与率は9.6%だった。海面水温の主成分分析と比べると、表層水温は時係数の時間変動で短周期成分が小さく、数年から数十年スケールの変動がより明瞭にみられており、十年規模の変動をみるのに適していることがわかる。海洋表層は大気に対して熱容量が大きいいため、大気の短周期変動の影響を受けやすい海面水温よりも

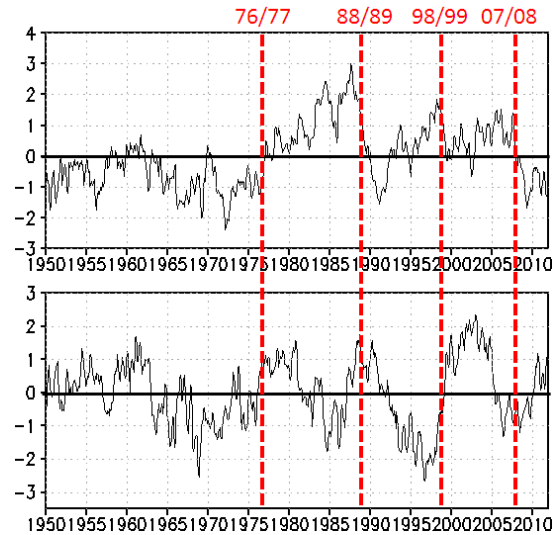


図7 北太平洋の十年規模変動にみられる月平均表層水温偏差から求めた時係数の経年変動
北緯20度以北の北太平洋域の月平均表層水温（海面から深さ700mの平均）偏差（1950～2011年）から全球平均を引いたのち主成分分析して得られた第1主成分（上）及び第2主成分（下）の時係数の経年変動を示す。

ゆっくりと変動しているためである。また、客観解析で、海面水温に比べて短周期変動の平滑化が強くなされているためでもある。

第1主成分と第2主成分の変動に特徴的な表層水温の分布として、それぞれの時係数から回帰した表層水温偏差の回帰係数を図8に示す。第1主成分の回帰係数は北太平洋中央部で負、アラスカ湾からカリフォルニア沖にかけての北米大陸沿岸で正であり、北太平洋ではPDOによる海面水温の回帰係数と同じ分布をしている。時係数の経年変動も海面水温と一致しており、表層水温の第1主成分はPDOを反映している。ただし、表層水温では、北太平洋の北緯20度に沿って東西に細長く正の係数が分布しているという特徴がある。また、太平洋熱帯域では係数が北太平洋に比べて小さく、特に東部の正の係数が顕著ではないことが海面水温と異なっている。もともと熱帯域での表層水温の変動は中高緯度に比べて大きくないためと考えられる。第2主成分の時係数は海面水温の時係数と整合的であるが、より長周期の変動がはっきりしている。北太

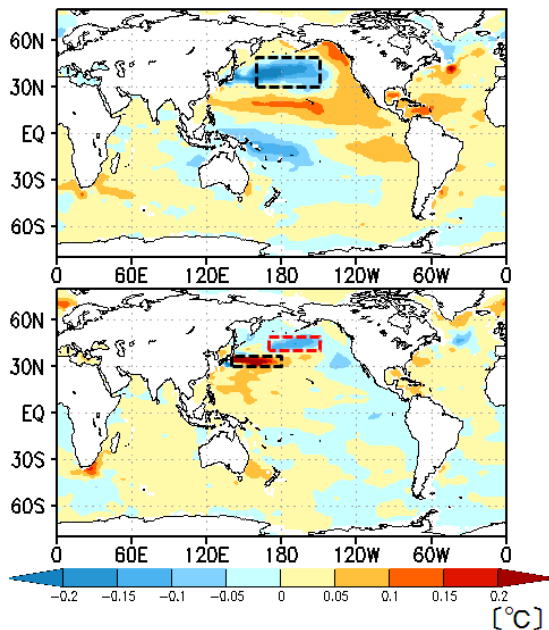


図8 表層水温の第1主成分と第2主成分の時係数から回帰した表層水温の回帰係数
第1主成分の時係数から回帰した回帰係数（上）と第2主成分の時係数から回帰した回帰係数（下）。統計期間は1950年から2011年。単位は℃。

平洋の回帰係数は北緯40度を挟んで南北逆符号となる分布が現れていて、海面水温の第2主成分と同じ変動をみているといえる。ただ

し、北緯40度以南にみられる正の回帰係数は、もともと変動の大きい黒潮続流域で大きい値となっていて、分布がやや西に偏っている。時係数を詳細に比較すると、表層水温の時係数は海面水温の時係数の変動に数年遅れており、海面水温でみられた変動が海洋内部を伝播して表層水温の変動として現れている可能性が考えられる。また、熱帯域では変動がもともと大きくないため、回帰係数の分布に目立った特徴はみられない。

図9は、海面水温で着目した、1976/77年、1988/89年、1998/99年、2007/08年の変化が表層水温にどのように現れているかを調べるために、図3と同様にそれぞれの境について、後ろ10年（ただし、2007/08年についてはデータのある2011年までの4年）の平均表層水温から前10年の平均表層水温を引いた差である。表層水温にも海面水温と同じような変動が見られることが分かる。

5. 結論

北太平洋中高緯度では、1976/77年に北緯40度付近を中心に広い範囲で海面水温が低下、

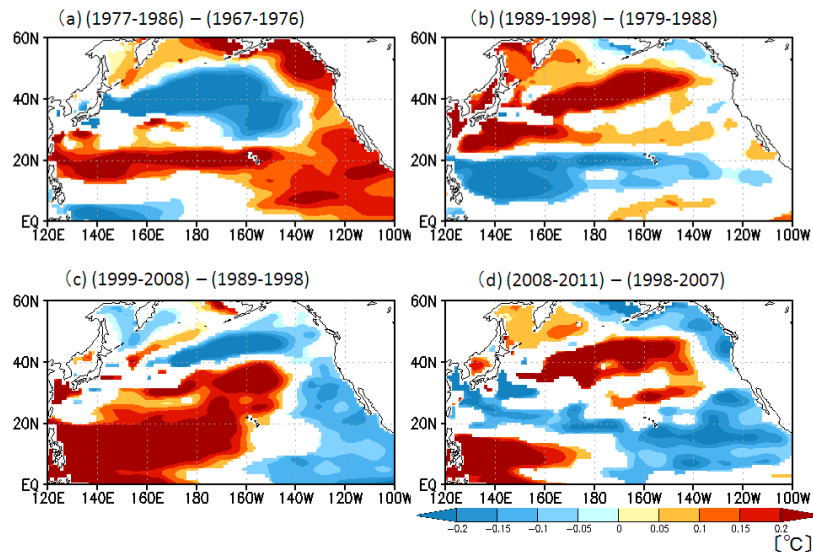


図9 1976/77年、1988/89年、1998/99年、2007/08年前後の表層水温の変化
それぞれの境の後ろ10年の平均表層水温偏差から前10年の平均表層水温偏差を引いた差。ただし、2007/08年については2008年から2011年までの平均から2007年までの10年平均値を引いた差。単位は℃。信頼度95%で統計的に有意な差である海域についてのみ示す。

1988/89年に北緯40度以北を中心に広範囲に海面水温が上昇、1998/99年に北緯40度を境に北側で海面水温が広範囲に低下、南側で広範囲に上昇した。また、2007/08年には北緯40度付近を中心に海面水温が上昇した。これらの年には表層水温も同様に变化した。

1976/77年の変化後は、水温が低い状態が北太平洋中高緯度で10年程度持続した。この期間、大気ではアリューシャン低気圧が強まった。この状態は、正の太平洋十年規模変動（PDO）として北太平洋の海面水温偏差の第1主成分により説明される。一方、1988/89年の変化による北太平洋中央部で水温が高い状態は3年程度持続したのみであった。この変化は、1976/77年の変動とは違い、北極域に寒気が蓄積される位相の正の北極振動に関連した主に中緯度以北で起こった一時的な変動であった。1998/99年の変化後は、北緯40度を境に北側で水温が低く、南側で高い状態が、途中で一旦解消したものの10年程度持続した。この変化は、PDOとは海面水温分布がやや異なるものの、海面水温偏差の第2主成分により主に説明される北太平洋の十年規模の変動であったと考えられる。2007/08年の変化後は、北緯40度付近で海面水温が高い状態が5年程度持続しており、北米沿岸など他の海域の海面水温分布を含めて負のPDOの状態となっている。ただし、この変動が十年規模変動に該当する持続性をもつかどうかは、今後の推移をみて判断する必要がある。

参考文献

- Bond, N. A., J. E. Overland, M. Spillane and P. Staveno, 2003: Recent shifts in the state of the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 30(23), 2183, doi:10.1029/2003GL018597
- Di Lorenzo, E., N. Schneider, K. M. Cobb, P. J. S. Franks, K. Chhak, A. J. Miller, J. C. McWilliams, S. J. Bograd, H. Arango, E. Curchitser, T. M. Powell and P. Rivere, 2008: North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Reophys. Res. Lett.*, 35, L08607, doi:10.1029/2007GL032838
- Ishii, M. and M. Kimoto, 2009 : Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.*, 65, 287-299.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto and T. Matsumoto, 2005 : Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, 25, 865-879.
- Luo, J.-J. and T. Yamagata, 2001: Long-term El Nino-Southern Oscillation (ENSO)-like variation with special emphasis on the South Pacific. *J. Geophys. Res.*, 106, 22211-22227.
- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace and R.C. Francis, 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1069-1079.
- Nitta, T. and S. Yamada, 1989: Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 375-383.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- Trenberth, K.E., 1990: Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 988-993.