

# 気象庁表層水温解析で見た近年の地球温暖化の停滞と十年規模変動

福田義和、伊藤渉(気象庁海洋気象課)、ト部佑介(気象庁気候情報課)

## 1. はじめに

過去 100 年にわたって上昇してきた全球平均気温は 21 世紀に入ってから上昇が見られなくなり、地球温暖化の停滞(hiatus)として注目を集めている。地球温暖化に伴って増加した気候系のエネルギーの 60% 以上は海洋表層に蓄積されているため(IPCC, 2013)、地球温暖化に関わるエネルギー収支の変化を評価するには海洋表層水温変動の見積もりが重要である。

地球温暖化は時間スケールが 100 年規模の現象であるが、十年規模の時間スケールでは温度上昇が停滞する期間と、逆に加速する期間がある。元々、自然界には十年規模の周期変動があり、例えば北太平洋では海面水温の代表的な時空間パターンである Pacific Decadal Oscillation (PDO; Mantua et al., 1997) や、モデルの再現実験による北太平洋東部の海面水位の変動で定義される North Pacific Gyre Oscillation (NPGO; Di Lorenzo et al., 2008) が知られている。これらのメカニズムはいまだ議論されているところであり、海洋表層貯熱量の変動との関係については未解明の部分が多い。

そこで、本稿では、気象庁が現業運用している全球表層水温解析値を用いて、近年の地球温暖化の停滞期における全球海洋表層貯熱量の増加傾向の変化や、北太平洋の十年規模変動に関係した表層水温の変動を示す。

## 2. データ

主として、気象庁が現業的に運用している全球表層水温・塩分解析の水温解析値を用いた。この解析は Ishii and Kimoto(2009)の手法によるもので、現場観測を元に、全球緯度経度 1 度格子、海面から 700m までの 16 層、1950 年 1 月以降について月毎の水温と塩分を 3 次元変分法で解析している。解析値は気象庁

の「海洋の健康診断表」<sup>1</sup>の中の「表層水温の長期変化傾向(全球)」の診断の基礎データである。他に、大気場のデータとして NCEP/NCAR 再解析値(Kalnay et al. 1996)を用いた。

## 3. 地球温暖化の停滞

全球平均気温は 100 年の時間スケールで上昇傾向にあるが、十年程度の時間スケールでは 1998 年以降上昇率が小さくなっていて(図 1; Easterling and Wehner, 2009; Cohen, 2012; IPCC, 2013 など)、地球温暖化の停滞として注目を集めている。海洋表層貯熱量も 2000 年代に入ってから増加率はそれ以前に比べて小さく、地球温暖化の停滞が現れている。しかし、細かく見ると全球平均気温と海洋表層貯熱量の変動に異なる点がある。全球平均気温は 1998 年に極大となったのち、上昇が停滞して明瞭な変化傾向を示さない。一方で表層貯熱量は 2003 年の極大ののち 2007 年に極小となり、その後は再び増加に転じている。表層貯熱量の年々変動の見積もりは解析手法ごとに違いがあるため(Lyman et al., 2010)、表層貯熱量が 2003 年に極大となったか否かは不明であるものの、直近の 10 年である 2003 年から 2012 年で表層貯熱量は増加傾向にあり、海洋表層の水温上昇は止まっていない。また、全球平均気温は極大となった 1998 年から上昇が停滞しているが、表層貯熱量の増加が停滞するのは 21 世紀に入ってからである。1998 年の全球平均気温が高かった要因の一つに 1997/98 年のエルニーニョ現象の影響があると考えられる。エルニーニョ現象が発生すると、太平洋赤道域の海面水温の東西コントラストが小さくなり、西部では海面水温が低下するが、中部から東部の海面水温が大きく

---

1  
<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/index.html>  
1  
2014 年 1 月 15 日閲覧

上昇して全球平均気温を押し上げる。しかし、エルニーニョ現象に伴う太平洋赤道域の水温変動は温度躍層付近で最も大きくなるため、太平洋赤道域東部に比べて温度躍層の深い西部の水温低下は海面水温よりも表層水温に明らかに現れる。このため、表層貯熱量では太平洋赤道域東部の水温上昇と西部の水温低下が相殺されてエルニーニョ現象の影響が現れにくく、1998年は極大にならなかった。

ところで、温暖化の停滞は全球的に見られるのであろうか。図2に大洋ごとの貯熱量偏差を示す。どの海域も50年の時間スケールでは貯熱量は増加しているが、十年規模の時間スケールではそれぞれ異なった変動をしている。北太平洋では2000年ごろ、南太平洋、北大西洋では2000年代半ばごろ以降に貯熱量増加が停滞している。一方、インド洋は2000年代半ば以降むしろ貯熱量が急激に増加している。それぞれの変動のメカニズムや相互の関連は本調査の範囲を超えるが、始まる時期の前後や程度の大小はあれインド洋を除いて広く貯熱量増加が停滞していることは興味深い。

地球温暖化の停滞の一因として、海洋での近年の熱の蓄積が、海面付近よりもより深いところで進んでいる可能性が指摘されている(Meehl et al., 2013)。海面から700mまでの表層貯熱量が、速度を落としつつも増加を続けていることもその一端を示している。海洋表層水温を現業運用では700mまで解析しているが、試みにこれを3000mまで拡張し、深さごとの貯熱量の変化を調べた(図3)。海面から300mの貯熱量は図1と同じく、2003年に極大、2007年に極小となり、その後は増加していた。300mから2000mまでの各層は年々の変動はありつつも増加を続けていて、他の解析(Levitus et al., 2012など)と同じくMeehl et al.(2013)の主張を裏付けている。2000mから3000mの層はほとんど貯熱量が変化していない。ただし、2000mを超える観測データ数は近年においても非常に少ないため、ここについて議論を行うには、より多くの観測の蓄積と詳細な調査が必要である。

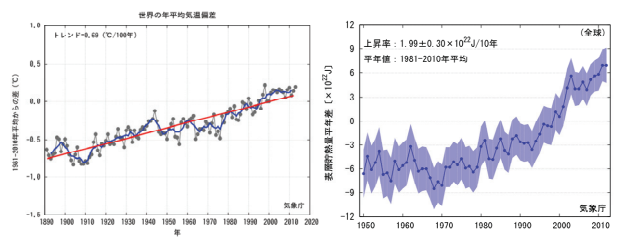


図1 全球平均気温偏差(左)と全球海洋表層(海面から700mまで)貯熱量偏差(右)

左図は、毎年の値(黒)、5年移動平均値(青)、長期的な変化傾向(赤)を示す。右図は年平均値(実線)、95%信頼区間(陰影)を示す。いずれも1981~2010年平均値からの偏差で、気象庁ウェブサイトから転載<sup>2</sup>。左右の図で期間(横軸の範囲)が違うことに注意。

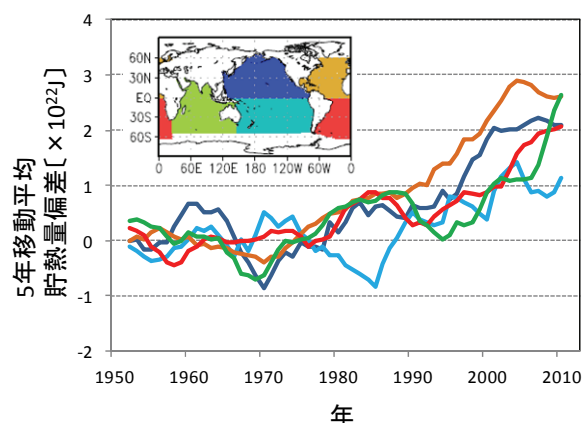


図2 各大洋の表層貯熱量偏差

各大洋の海面から700mまでの貯熱量偏差の5年移動平均。北太平洋(青)、南太平洋(水色)、北大西洋(オレンジ)、南大西洋(赤)、インド洋(緑)について。各大洋の範囲を左上の地図に示した。1951~1980年平均値からの偏差の5年移動平均値を示す。

<sup>2</sup>

<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/annual.html> および

[http://www.data.kishou.go.jp/kaiyoku/shindan/a\\_1/ohc/ohc\\_global.html](http://www.data.kishou.go.jp/kaiyoku/shindan/a_1/ohc/ohc_global.html)

2014年1月15日閲覧

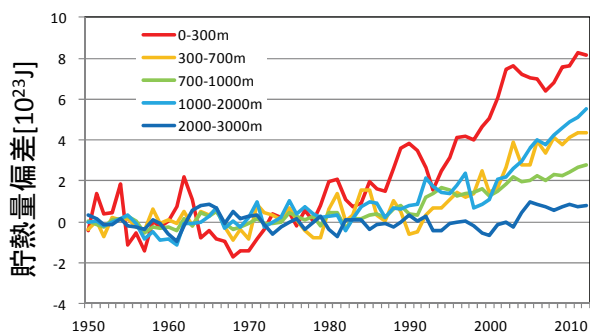


図3 深さごとの全球海洋貯熱量偏差  
各層の全球海洋貯熱量偏差。1951～1980年平均値からの差を示す。

#### 4. 北太平洋の十年規模変動

北太平洋の北緯 20 度以北の海面水温偏差の EOF 第 1 モードで定義される PDO は十年規模の時間スケールの変動を示す(Mantua et al, 1997)。1990 年代以降の海面水温の十年規模変動は、PDO だけでは十分に説明できず、ヴィクトリアモードと呼ばれる EOF 第 2 モードも考慮する必要があると指摘されている (Bond et al, 2003)。一方、Di Lorenzo et al.(2008)はモデルの海面水位の EOF 第 2 モードを NPGO と定義し、カリフォルニア沿岸の塩分や化学生物成分の十年規模変動と対応がよいことを示した。ヴィクトリアモードと NPGO は解析対象が海面水温と海面水位と異なっているほか、解析領域も異なっているが、同じ変動の異なった側面を捉えていると考えられている (Di Lorenzo et al., 2008)。

海面水温および表層水温について、PDO の定義に従って EOF 解析を行った(図 4)。海面水温の第 1 モードは定義通り PDO を表している。第 2 モードはヴィクトリアモードであるが、時係数の変動は NPGO 指数(Di Lorenzo et al., 2008 の Figure 1 参照)とよく対応している。また、空間分布の特徴である北緯 40 度を境にした南北でダイポールの水温変動は NPGO 指数と海面水温の相関係数の分布(Di Lorenzo et al., 2008 の Figure 4 参照)と類似しており、ヴィクトリアモードと NPGO が同じ変動を表していることが確認される。表層水温の第 1 モード、第 2 モードもそれ

ぞれ時係数や空間パターンが海面水温と一致しており、PDO と NPGO に関する表層水温の変動を示していると考えられる。

北太平洋では、1976/77 年にレジームシフトが起き (Yasunaka and Hanawa, 2002)、この時期に PDO 指数は負から正へと大きく変化した。また、1998/99 年のレジームシフト(Minobe, 2002)では NPGO 指数が大きく変化した(Bond et al, 2003; 気象庁, 2013)。図 4a、b でも、海面水温と表層水温の第 1 モードの時係数は 1976/77 年前後で大きく変化し、第 2 モードの時係数は 1998/99 年前後で大きく変化している。そこで、以下では 1976/77 年と、1998/99 年のレジームシフトに着目し、その前後 10 年の平均水温場や大気場の差からそれぞれの変化の特徴を示す。なお、時間スケールが十年規模の変動において、大気から海洋への影響が冬季に現れやすいことから、以降は冬(前年 12 月から当年 2 月)平均値について、10 年平均値の差を示す。

それぞれのレジームシフトに伴う表層水温変化の空間分布を図 5 に示す。1976/77 年を境に、表層水温は北太平洋中央部で低下し、北米大陸西岸で上昇した(図 5 左)。このパターンは EOF 第 1 モード(図 4e)とよく似ていて、PDO に伴う典型的な水温変化が現れている。1998/99 年前後では(図 5 右)、亜熱帯域西部の水温上昇が顕著であるが、中緯度域に注目すると北緯 40 度を挟んで南で水温が上昇、北で低下している。この分布は EOF 第 2 モード(図 4f)と共通であり、この領域での変化の特徴を捉えている。

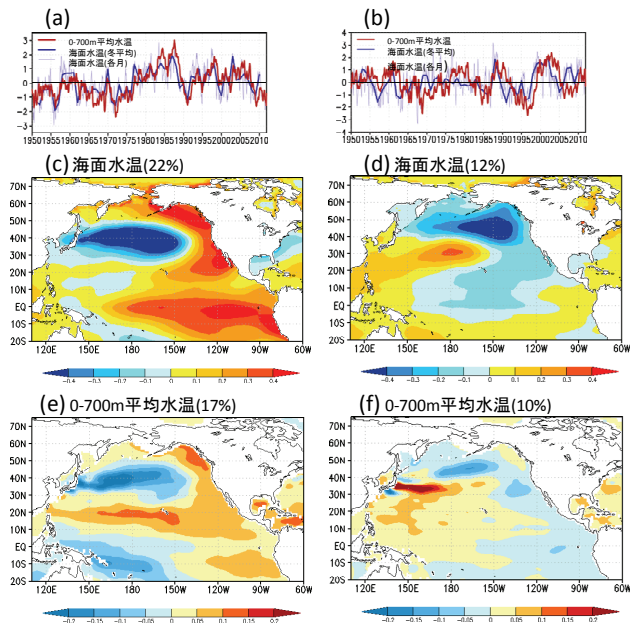


図4 北太平洋海面水温と表層水温の EOF モード  
太平洋の北緯 20 度以北の海面水温偏差と表層水温 (海面から 700m までの平均水温)偏差を EOF 解析して得られた第 1 モード(左列)と第 2 モード(右列)。地球温暖化の影響を除くため EOF 解析する前に各格子点の偏差から全球平均偏差を引いている。時係数(a、b)、海面水温の時係数と海面水温偏差との回帰係数(c、d)、表層水温の時係数と表層水温偏差との回帰係数(e、f)を示す。北緯 20 度以北に限れば c~f は EOF の空間パターンにほぼ一致する。

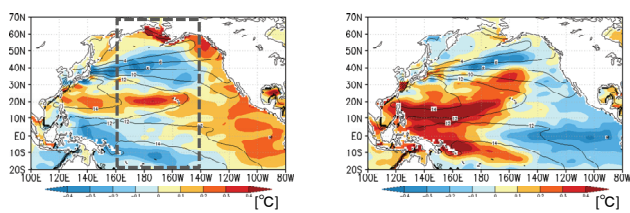


図5 表層水温の変化  
冬季の海面から 700m 平均水温の 1977~1986 年平均値から 1967~1976 年平均値を引いた差(左)と 1999~2008 年平均から 1989~1998 年平均を引いた差(右)。陰影が差を表し、等値線は各期間の前後合わせて 20 年間の平均値を示す。左図の灰点線は図 6 で東西平均した範囲を示す。

東西平均した水温の鉛直分布(図 6)では、1976/77 年前後の北太平洋中央部の表層水温の低下は等温線に沿って深さ 400m まで広がる一方で、北緯 20 度の深さ 100m から 500m では水温が上昇している。亜熱帯循環の形に対応する等温線は深くなっており、亜熱帯循環の強化を示している。1998/99 年の前後では、北緯 40 度を挟んで北で水温が低下、南で上昇して温度勾配が急になり、循環が強化している。また、北緯 15 度付近の 100m から 400m 付近で昇温しており、亜熱帯循環が南に広がっている。これは Qiu and Chen(2012)がフィリピンの東の海面水位上昇に関連して示した北赤道海流の南下と対応している。

次に、表層水温変動に関する、大気からの強制について調べた。1976/77 年前後で、アリューシャン低気圧が強化した(Nitta and Yamada, 1989)。このため、北太平洋中央部の北緯 40 度付近で偏西風が強まった(図 7 左)。その結果、潜熱フラックス(図 8)とエクマン輸送(図 9)による冷却によって北太平洋中央部の表層水温が広く低下した(Yasuda and Hanawa, 1997)。1998/99 年以降、アリューシャン低気圧の位置が北偏し(Sugimoto and Hanawa, 2009)、風応力の回転成分が北緯 50 度を境に北で低気圧性偏差、南で高気圧性偏差となった(図 7 右)。このため、偏西風の位置も北偏して北緯 40 度以北で強化、以南で弱化し、表層水温が北緯 40 度以北で低下、以南で上昇したことと空間分布が対応している。しかし、北緯 40 度以南にエクマン輸送による加熱の寄与があった以外には、海面熱フラックス、エクマン輸送とも表層水温の変化と対応していない(図 8、9)。1998/99 年前後の水温変化の要因は今後の検討課題である。

最後に、変動が顕著に現れる北太平洋中央部の表層貯熱量の時間変動と、同じ領域で平均した風応力の回転成分(エクマン収束、発散に対応)、東西成分(エクマン流の南北成分と風応力の強さに対応)、海面での熱フラックスの変動を調べた(図 10)。北太平洋中央部の表層貯熱量は、1970 年代から 1980 年代にかけて減少し、1990 年ごろに急激に増加した。1990 年代に入ると南部だけ表層貯熱量が減少した。その後、

1990年代から2000年代初めにかけて、1998/99年のレジームシフトに代表されるように、表層貯熱量は南北で反対に変動し、全体としては大きな偏差を示さない。2000年代半ば以降は再び南北がともに増加している。1970年代から80年代の表層貯熱量の減少は風応力、熱フラックスともに寄与があった。1990年代から2000年代にかけての表層貯熱量の変動は、北部では風応力の東西成分、南部では回転成分と対応していた。2000年代半ば以降の増加は風応力、熱フラックスともに寄与しているようだが、期間が短いためまだ不明瞭である。

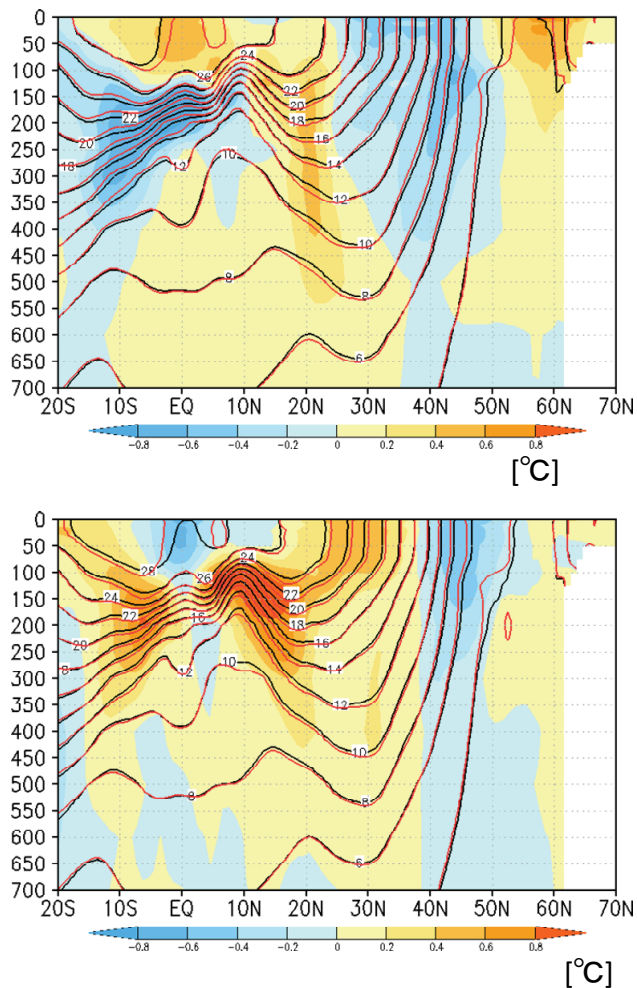


図6 東西平均水温の変化

上は東経160度から西経140度で東西平均した水温の1977~1986年平均値(赤等値線)、1967~1976年平均値(黒等値線)とその差(陰影)。下は1999~2008年平均値と1989~1998年平均値について。

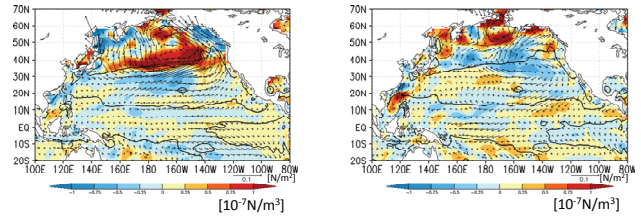


図7 風応力の変化

冬季の風応力に関する1977~1986年平均値と1967~1976年平均値の差(左)と、同じく1999~2008年平均値と1989~1998年平均値の差(右)。陰影は回転成分の差、矢印が風応力ベクトルの差を示す。実線はそれぞれの期間全体で平均した風応力回転成分が0の位置を示す。

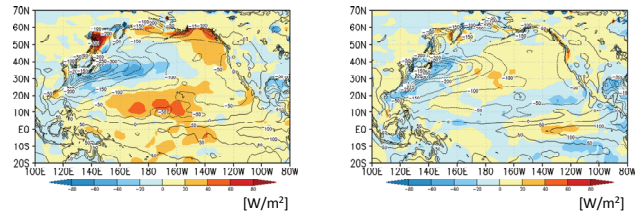


図8 海面熱フラックスの変化

図5に同じ。ただし、正味の熱フラックス(短波放射、長波放射、潜熱、顕熱の総和)について。下向き(海洋を暖める方向)を正とする。

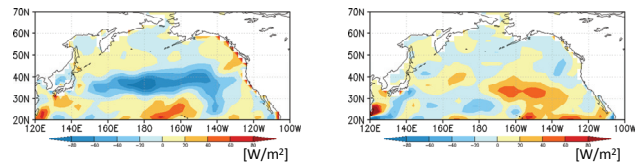


図9 エクマン輸送による加熱

図5に同じ。ただし、風応力と水温から求めた北緯20度以北のエクマン輸送による加熱量について。また、平均値は示していない。

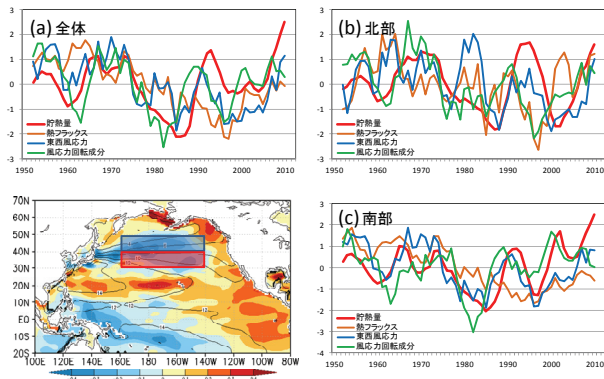


図 10 領域平均時系列

北太平洋中央部で平均した海洋表層(海面から 700m)貯熱量(赤線)、正味の熱フラックス(橙線)、風応力東西成分(青線)、風応力回転成分(緑線)。a:東経 160 度～西経 140 度、北緯 30 度～北緯 50 度の平均、b:この領域の北緯 40 度以北の平均、c:以南の平均。左下には図 5 左を再掲し、領域平均した範囲を赤四角、青四角で重ねて示す。それぞれ冬季(12～2 月)平均の 5 年移動平均値を全期間の標準偏差で規格化した値。風応力の東西成分と回転成分は比較を簡単にするために正負の符号を反転し、西向き偏差と高気圧偏差を正にして示す。

## 5. まとめ

全球平均気温に見られる 2000 年代に入ってから地球温暖化の停滞に対して、海洋表層貯熱量の増加率も鈍化していた。しかし、全球平均気温と異なり海洋表層貯熱量は最近 10 年間で引き続き増加傾向にあった。

北太平洋の 10 年規模の変動に関連して、1976/77 年前後に北太平洋中央部で表層水温が低下し、1998/99 年前後に北緯 40 度以南で表層水温が上昇、以北で水温が低下していた。1970 年代から 80 年代に北太平洋中央部の表層貯熱量は広い海域で減少したが、1990 年代から 2000 年代初めにかけては北緯 40 度を境に南北で反対に変動した。2000 年代半ば以降再び南北がともに増加している。

本稿では表層水温に注目して変動の実態を整理してきた。しかし、地球温暖化の停滞に関連して海洋のどの海域で熱を蓄積しているか、過去の停滞期は

どうだったのか、あるいは、十年規模変動に関連して現れる表層水温偏差がどのように時空間変化していくのか、熱フラックスや風応力場の変動は海洋表層の循環の変動とどのように関係しているのかなど様々な疑問が未調査で残っていて、今後の課題である。

## 参考文献

- Bond, N. A., J. E. Overland, M. Spillane, and P. Stabeno, 2003: Recent shifts in the state of the North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2183, doi:10.1029/2003GL018597, 23.
- Cohen, J. L., J. C. Furtado, M. Barlow, V. A. Alexeev, and J. E. Cherry, 2012: Asymmetric seasonal temperature trends, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L04705, doi:10.1029/2011GL050582.
- 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. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08607, doi:10.1029/2007GL032838
- Easterling, D. R., and M. F. Wehner, 2009: Is the climate warming or cooling?, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08706, doi:10.1029/2009GL037810.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA..
- 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.
- 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. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- 気象庁, 2013:海洋の健康診断表 総合診断表第 2 版 2.1.1 北太平洋の海面水温・表層水温, [http://www.data.kishou.go.jp/shindan/sougou/html\\_vol2/2\\_1\\_1\\_vol2.html](http://www.data.kishou.go.jp/shindan/sougou/html_vol2/2_1_1_vol2.html) (2014 年 1 月 9 日閲覧)
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, O. K. Baranova, H. E. Garcia, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, J. R. Reagan, D. Seidov, E. S. Yarosh, and M. M. Zweng, 2012: World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L10603, doi:10.1029/2012GL051106.
- Lyman, J. M., S. A. Good, V. V. Gouretski, M. Ishii, G. C. Johnson, M. D. Palmer, D. A. Smith, and J. K. Willis. 2010: Robust warming of the global upper ocean. *Nature*, **465**, 334-337, doi:10.1038/nature09043.
- 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.
- Meehl, Gerald A., Aixue Hu, Julie M. Arblaster, John Fasullo, Kevin E. Trenberth, 2013: Externally Forced and Internally Generated Decadal Climate Variability Associated with the Interdecadal Pacific Oscillation. *J. Climate*, **26**, 7298–7310.
- Minobe, S., 2002: Interannual to interdecadal changes in the Bering Sea and concurrent 1998/99 changes over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.* **55**, 45-64.
- 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.
- Qiu, B., and S. Chen, 2012: Multidecadal Sea Level and Gyre Circulation Variability in the Northwestern Tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 193-206.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa, 2009: Decadal and interdecadal variations of the Aleutian Low activity and their relation to upper oceanic variations over the North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 601-614.
- Yasuda, T. and K. Hanawa, 1997: Decadal changes in the mode waters in the midlatitude North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 858-870.
- Yasunaka, S. and K. Hanawa, 2002: Regime shifts found in the Northern Hemisphere SST field. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 119-135.