

全球平均海洋表層水温の長期変化傾向

福田 義和*

1. はじめに

海洋は大気に比べて膨大な熱容量をもっており、気候系のエネルギー収支を考える上で、重要な役割を果たしている。気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) 第4次評価報告書 (IPCC 2007) では、1955年以降世界の海洋は昇温しており、海洋が吸収した熱量はこの期間の気候システム全体のエネルギー変化量の80%以上を占めていると評価している。また、海洋が吸収した熱量の3分の2は海面から深さ700mまでの海洋表層に蓄積されたとしている。このため、気候変動の実態を把握するうえで、海洋表層貯熱量の監視は必要不可欠である。

気象庁では、地球環境に関連した海洋現象の現状と今後の見通しなどを総合的に解析し、「海洋の健康診断表」として2005年からホームページなどで公開している (<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/index.html>)。これまでも「海洋の健康診断表」では、気候変動に関わる解析結果として全球平均海面水温や日本近海の海面水温の長期変化傾向などを公開してきた。2012年2月には、海洋表層貯熱量の変動の指標として全球平均表層水温の変化傾向を新たに追加した。さらに、表層水温の上昇に伴う海水の熱膨張が全球平均海面水位の上昇にどの程度寄与するかについても評価した。本稿ではこれらについて紹介する。

2. 平均表層水温データの概要

新たに公開した情報では、海面から深さ700mまでの全球年平均水温について1950年以降の長期変化傾向

を計算した。平均水温は海洋の貯熱量を熱容量で割り求めている。

海洋の貯熱量と熱容量は水温と塩分によって求められる (Fofonoff and Millard 1983)。今回、水温は気象庁が現業運用している全球表層水温解析値、塩分は米国海洋大気庁国立海洋データセンター (National Oceanic and Atmospheric Administration National Oceanographic Data Center: NOAA NODC) による気候値 (World Ocean Atlas 2005: WOA05, Antonov *et al.* 2006) を用いて計算した。気象庁の表層水温解析は、気象研究所で開発された Ishii and Kimoto (2009) の手法による。全球1度格子で、1950年1月以降月ごとに解析している (第1表)。解析手法は3次元変分法による客観解析である。WOA05 (Locarnini *et al.* 2006) による気候値を第一推定値とし、船舶、プイ、フロートなどによる現場観測データを入力値として、力学モデルは使わず統計的に計算している。なお、海面の水温偏差は気象庁が現業的に運用している海面水温解析値 (COBE-SST: Centennial in-situ Observation Based Estimates of variability of SST and marine meteorological variables: COBE

第1表 表層水温客観解析の概要。

客観解析手法	3次元変分法
解析範囲	全球
空間解像度	緯度経度1°格子 0~700mまでの16層
解析期間	1950年1月~
解析間隔	1か月ごと
観測データ	船舶、プイ、フロートなどによる現場水温観測

* Yoshikazu FUKUDA, 気象庁地球環境・海洋部。

© 2012 日本気象学会

の SST 解析値, Ishii *et al.* 2005) に一致するように計算しており, 混合層内の水温解析にも COBE-SST の水温偏差を取り入れている。

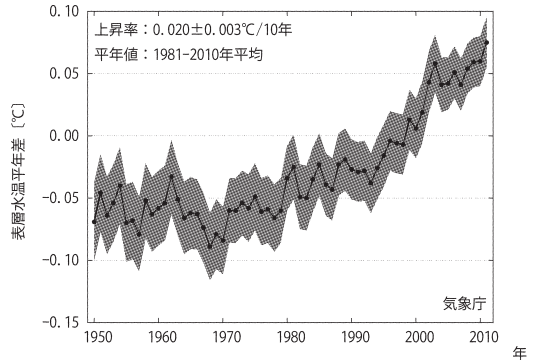
ここで, 表層水温解析に用いる観測データに関連して, 投下式水温水深計 (expendable bathythermograph: XBT) と呼ばれる測器の観測値バイアスについて少し触れておきたい。XBT はサーミスタ温度計のついたプローブを船上から投下して海洋内部の水温を計測する測器である。プローブは水温を計測しながら自由落下し, 観測深度は海面に着水してからの経過時間から計算する。投下した後は測器を操作する必要がなく, その利便性によって1960年代以降広く使われている。観測船だけでなく商船などによる篤志観測でも用いられてきたため, 2000年代に Argo フロート (気象庁 2011) が全球に展開するまで, 海洋表層の観測において主要な位置を占めていた (Ishii and Kimoto 2009)。一方, XBT の観測では落下時間から求める観測深度にバイアスがあることが分かっている (Hanawa *et al.* 1995)。従来, 観測深度のバイアスは一様だと考えられてきたが, 近年このバイアスが年代によって変化することが明らかになってきた (Gouretski and Koltermann 2007)。製造年代やメーカーなどの違いによって同じ型式であっても換算係数に微妙な差異があるとも指摘されている (Ishii and Kimoto 2009)。気象庁の表層水温解析では Ishii and Kimoto (2009) の手法で近傍にある精密だと考えられている観測と比較し, このバイアスを補正している。

3. 結果

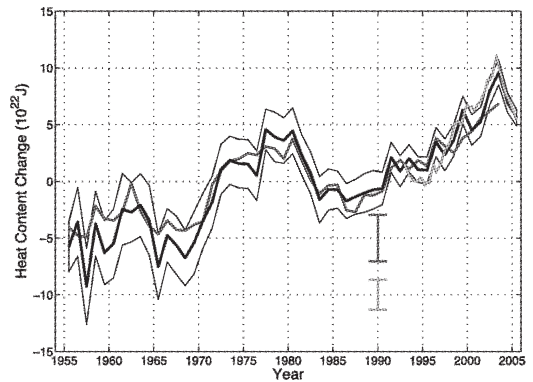
全球年平均海洋表層水温平年偏差の時系列を第1図に示す。全球平均海洋表層水温は年ごとに上昇下降を繰り返しつつも1950年以降長期的に上昇傾向にあり, 1950年から2011年の間に10年あたり $0.020 \pm 0.003^\circ\text{C}$ (±は95%の信頼区間) の割合で上昇していた。近年では1990年代半ばから2000年代初めにかけて特に大きな昇温が見られ, その後も水温が高い状態が続いている。同じ期間で COBE-SST の全球平均は10年あたり 0.072°C の割合で上昇していたため, 海洋表層の上昇率は海面水温の上昇率に比べると小さくなっている。

「海洋の健康診断表」では貯熱量についてもデータを公開している。1950年から2011年の水温上昇に対応して, 全球海洋表層貯熱量は10年あたり $1.94 \pm 0.31 \times 10^{22}\text{J}$ 増加していた。IPCC (2007) では, 1961年から2003年の間に海面から深さ700mまでの表層貯熱量が

$8.11 \pm 0.74 \times 10^{22}\text{J}$ 増加したと見積もっており (第2図), 長期変化傾向は同程度の値となっている。しかし, IPCC (2007) では, 1980年ごろに極大をもつ数十年規模の変動が見られる一方, 今回の解析ではそのような変動は見られない。XBT の観測深度のバイアス補正の有無でこのような違いが出るのが指摘され



第1図 表層水温平年差の推移。海面から深さ700mまで平均した表層水温平年差。年平均平年差を実線, 解析値の95%信頼区間を陰影で示す。平年値は1981年から2010年の30年平均値。上昇率の±は95%の信頼区間を表す。



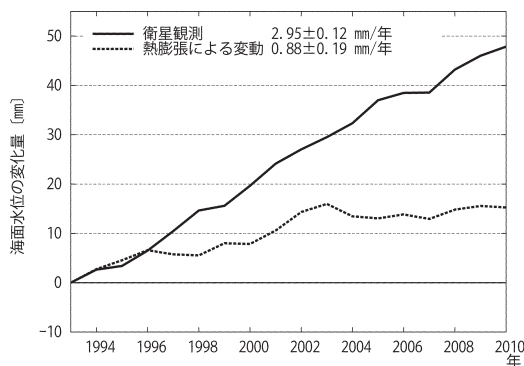
第2図 IPCC (2007) での海洋表層貯熱量変化の評価。海面から深さ700mまでの海洋表層貯熱量。黒太線と黒細線は Levitus *et al.* (2005) による評価とその90%信頼区間。濃い灰線は Ishii *et al.* (2006), 薄い灰線は Willis *et al.* (2004) による評価と90%信頼区間。ただし, Willis *et al.* (2004) は海面から750mまでの貯熱量であり, 衛星観測を用いて解析しているため解析期間が短い。IPCC (2007) の Figure 5.1を引用。

ており (Ishii and Kimoto 2009), IPCC (2007) に見られる1980年ごろの極大は XBT の観測値のバイアスによる見掛け上のものだったと考えられる。XBT の観測値のバイアスについては, Ishii and Kimoto (2009) のほかにもいくつかの補正方法が提案されており (例えば, Wijffels *et al* 2008; Levitus *et al.* 2009), いずれの解析においても1980年ごろの極大は見られない。また, IPCC (2007) に見られる最後数年の低温化傾向も XBT の観測値のバイアスの影響があったと指摘されている (Ishii and Kimoto 2009)。

水温上昇は全球一様に起きているわけではない。南北太平洋, 北大西洋, インド洋の5大洋に分けてみると, 海洋表層貯熱量の増加率は北大西洋が最も大きく10年あたり $0.53 \pm 0.07 \times 10^{22}$ Jの増加となっていた (図省略)。これは平均表層水温では10年あたり $0.051 \pm 0.007^\circ\text{C}$ の上昇に相当し, 他の大洋の平均水温変化と比較しても北大西洋が一番大きく上昇していた。これらのデータについても「海洋の健康診断表」で見ることができる。

4. 水位変動との関連

地球温暖化の進行により, 海面水位の上昇が懸念されているが, その海面水位の上昇には, 水温上昇に伴う海水の熱膨張が一因として挙げられている。そこで, 海面から深さ700mまでの海洋表層の水温上昇に伴う海面水位の上昇量についても評価した。1993年以降の全球平均海面水位の変動を人工衛星の海面高度計による観測 (Kuragano and Kamachi (2000) に基づ



第3図 平均海面水位の推移。66°S から66°N までの海面水位を1993年の値からの変化量として表す。実線は衛星による観測値, 点線は海面から深さ700mまでの水温から推定した熱膨張による変動成分。

く気象庁現業解析)と比較した結果を第3図に示す。グラフは66°S から66°N までの平均海面水位の1993年からの変化量を示している。人工衛星の観測によると, 平均海面水位は1993年から2010年までの18年間に1年あたり $2.95 \pm 0.12\text{mm}$ の割合で上昇していた。一方, 海面から深さ700mまでの海洋表層の水温変化に伴う熱膨張によって, 海面水位は同じ期間に1年あたり $0.88 \pm 0.19\text{mm}$ の割合で上昇したと見積もられた。すなわち, 1993年から2010年までの海面水位の上昇量のうち約3分の1が, 海面から深さ700mまでの表層水温の上昇に伴う熱膨張によって引き起こされたことになる。

5. まとめ

気候変動において海洋が果たす役割は大きい。本稿では, 大気に比べて莫大な熱容量をもつ海洋が, 地球温暖化などの気候変動に伴ってどの程度変化しているか, 最新の知見を紹介した。今回紹介した海洋表層水温の情報は, 今後も年1回データを追加・更新していく。

海洋が気候変動において果たす重要な役割は熱の蓄積だけではない。例えば, 海洋は海面を通して大気から二酸化炭素を吸収し海洋内部に蓄積しており, 地球全体の炭素循環の一部を担っている。「海洋の健康診断表」では太平洋や大西洋における大気-海洋間の二酸化炭素交換量の長期変化や, 北西太平洋の現場観測データに基づく二酸化炭素蓄積量などを公開している。また, 地球温暖化よりも短い数年から数十年程度の時間スケールの変動として, 北太平洋の代表的な表層水塊である北太平洋亜熱帯モード水や北太平洋帰線水の変動, 黒潮の変動なども取り上げている。海洋からみた気候変動について興味をもたれた方は, ぜひ一度ご覧いただき, 活用いただければ幸いである。

参考文献

Antonov, J. I., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, A. V. Mishonov and H. E. Garcia, 2006: World Ocean Atlas 2005, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 62, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182pp.

Fofonoff, N. P. and R. C. Millard, 1983: Algorithms for Computation of Fundamental Properties of Seawater. UNESCO Tech. Papers in Marine Science 44, UNESCO, 53pp.

Gouretski, V. and K. P. Koltermann, 2007: How much is

- the ocean really warming? *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L01610, doi:10.1029/2006GL027834.
- Hanawa, K., P. Rual, R. Bailey, A. Sy and M. Szabados, 1995: A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBTs). *Deep-Sea Res.*, **42**, 1423-1451.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- 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.
- Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto and S. I. Iwasaki, 2006: Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, **62**, 155-170.
- 気象庁, 2011: 海洋の健康診断表 総合診断表【コラム】アルゴ (Argo) 計画. <http://www.data.kishou.go.jp/shindan/sougou/html/col2.1.1-1.html> (2012.4.16閲覧).
- Kuragano, T. and M. Kamachi, 2000: Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **105**, 955-974.
- Levitus, S., J. Antonov and T. Boyer, 2005: Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, H. E. Garcia and A. V. Mishonov, 2009: Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07608, doi:10.1029/2008GL037155.
- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer and H. E. Garcia, 2006: *World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature*. S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182pp.
- Wijffels, S. E., J. Willis, C. M. Domingues, P. Barker, N. J. White, A. Cronell, K. Ridgway and J. A. Church, 2008: Changing expendable bathythermograph fall rates and their impact on estimates of thermosteric sea level rise. *J. Climate*, **21**, 5657-5672.
- Willis, J. K., D. Roemmich and B. Cornuelle, 2004: Inter-annual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. *J. Geophys. Res.*, **109**, C12036, doi:10.1029/2003JC002260.