
特集「新海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM) による海洋情報の高度化」

全球表層水温解析の導入について*

木村 未夏**・伊藤 渉**・榎田 貴郁***

要 旨

海洋気象情報室では海洋表層の長期変動を調査し、気候システムの変化をモニターする目的で、平成 22 年度以降に全球表層水温解析システムの導入を予定している。本稿ではこのシステムの概要を説明する。また、全球表層水温解析をめぐる世界の動向を、とりわけ近年重要とされている観測機器のバイアス補正の問題に着目して、紹介する。

1. はじめに

地球表面の 7 割を占め大気の約 1000 倍もの熱容量を持つ海洋は、気候システムの温暖化に深くかかわっていると考えられる。また、海面水温の分布は、短い時間スケールでは大気の影響を強く受けるが、長い時間スケールでは大気の流れに大きな影響を与えるなど、海洋は気候システムにおける長い時間スケールの現象に対して支配的な役割を果たしている。

気象庁は、2005 年に過去 100 年にわたる長期の全球海面水温解析を導入し、以来、全球の海面水温の長期変化傾向に関する情報を提供している (気象庁, 2006a)。また、太平洋十年規模変動 (Pacific Decadal Oscillation : PDO) 指数 (北太平洋の海面水温変動の第一主成分の時係数) などの気候変動に関連する海洋情報も提供してきた (気

象庁, 2006b)。しかし、海洋内部についての長期にわたる全球の解析は、これまで行っていない。

ここ数年、気候システムの温暖化に対する社会的関心の高まりや観測データセットが整備されてきたことを背景として、全球表層水温解析の研究が世界で飛躍的に進展し、過去 50 年の解析が可能になってきた。このような状況の中、気象庁でも全球表層水温解析導入に向けての取り組みを開始した。以下では、全球表層水温解析をめぐる世界の動向を、とりわけ近年重要とされているバイアス補正の問題に着目して 2 章で解説する。3 章、4 章では、導入を計画している気象庁システムの概要、運用形態をそれぞれ紹介する。5 章、6 章では、観測機器のバイアスの状況を、同システムの解析結果を交えつつ概観する。最後に、同システムの今後の展望や課題を述べる。

* Development of the operational system in JMA of global ocean subsurface temperature analysis

** Mika Kimura, Wataru Itou

Office of Marine Prediction, Global Environment and Marine Department (地球環境・海洋部海洋気象情報室)

*** Takafumi Umeda

Climate Prediction Division, Global Environment and Marine Department (地球環境・海洋部気候情報課)

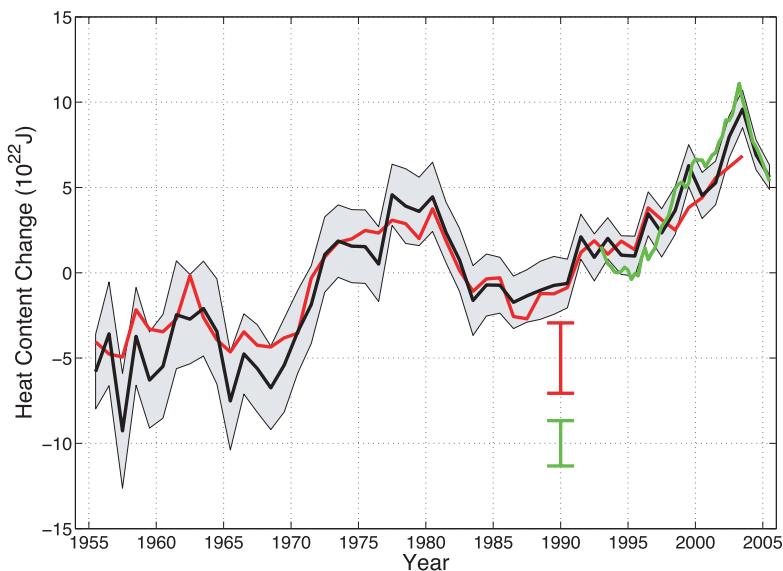
2. 全球表層水温解析をめぐる世界の動向

2007年に公表されたIPCC第4次評価報告書では、気候システムに温暖化が起こっていると断定するとともに、人為起源の温室効果ガスの増加が温暖化の原因であるとほぼ断定した。またこの報告書中において、Levitus *et al.* (2005) や Ishii *et al.* (2006, 以下 I2006) の表層水温解析の結果を引用し (Bindoff *et al.*, 2007), 最近 50 年間、海洋の貯熱量が増大してきたことが併せて指摘された (第 1 図)。

最近になって、Gouretski and Koltermann (2007) は、XBT (投下式水温水深計), MBT (メカニカル水温水深計) といった観測機器に高温バイアスが存在することを指摘して、これらの高温バイアスが前述の表層水温解析に見られる貯熱量の数十年規模変動に寄与していることを示唆した。XBT は、水圧 (深度) を測定しているわけではなく、投下してからの時間で深度を計算する。その落下式は時間の 2 次関数で表され、メーカーが決定したものがあがるが、Hanawa *et al.* (1995) が

その落下式の誤差を指摘して、それ以後、XBT と CTD (電気伝導度水温水深計) の比較観測で求めた Hanawa *et al.* (1995) の式が一般に使われてきた。しかし、Gouretski and Koltermann (2007) は、XBT, CTD 同時観測の場合だけでなく、場所と時期に近い XBT データと CTD やナンセン採水器のデータとを全海洋で比較し、Hanawa *et al.* (1995) の式で補正できない経年変化する高温バイアスがあることを発見した。

それ以来、各国が XBT の補正方法の検討を進めているが、(a) 単純に深度及び年の関数となっている補正值を XBT の水温に足し込むもの (Levitus *et al.*, 2009), (b) XBT の機器の種類や年ごとに、深度あるいは落下式の係数の補正をするもの (Wijffels *et al.*, 2008 ; Ishii and Kimoto, 2009, 以下 IK2009), (c) (b) の手法に鉛直一様なバイアスの補正を追加したもの (Gouretski, 2009) が提唱され、NOAA/NODC が相互比較のホームページを設立している (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/XBT_BIAS/xbt_bias.html)。



第 1 図 海洋の 0-700m 深の貯熱量偏差の時系列 (IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書の Fig.5.1 より転載)

黒線 : Levitus *et al.* (2005) の結果. 陰影は 90% の信頼限界.
 赤線 : Ishii *et al.* (2006) の結果. 赤棒は 90% の信頼限界.
 緑線 : Willis *et al.* (2004) の結果. 緑棒は 90% の信頼限界.

一方, Argo フロートの観測データの品質も, 表層水温解析の結果に重大な影響を及ぼす. Lyman *et al.* (2006) は, 2003 年から 2005 年にかけて, 海洋の貯熱量が急激に減少したと報告した. しかし, これは一部の Argo フロートの低温バイアスの影響を受けたことに加え, 上述した XBT の高温バイアスが影響した (最近の XBT データ数の減少に伴い, 見かけの貯熱量偏差の減少を生じた) ためであったと修正報告する事態となった (Willis *et al.*, 2007 ; Willis *et al.*, 2009). 将来は, こうした Argo フロートのバイアスについても補正方法が見つかると思われるが, 現在は, 解析から除外する対応を各国はとっている.

気象庁では, I2006 のシステムで現業運用の準備を行ってきたが, 観測測器に起因するバイアス補正の重要性から IK2009 のシステムへの移行を進めている. 以下のシステムの概要では, I2006 のシステムを記述しているが, IK2009 との相違は, 基本的には XBT 及び MBT のバイアス補正がない, ということであり, 解析手法そのものは同じであることに留意されたい.

3. システムの概要

全球表層水温解析システムでは, 現場観測データのみを使用して, 月ごとの全球の海洋表層の水温を客観解析によって求める. 水平解像度は $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 鉛直レベルは 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700m の 16 レベルである. 観測データについては, 空間分布の偏りを低減し, かつ解析の計算時間を節約するため, 必要以上に観測密度の細かいものについては鉛直方向には適度に間引きし (Vertical Thinning), 時間・水平方向には, 10 日ごとに, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の格子に含まれるものを平均して 1 つのデータとみなす (Merging). 海面は解析を実施せず, COBE-SST と呼ばれる海面水温解析を使用する. COBE-SST は, 現場観測データのための最適内挿法を採用しており, 気候情報課が現業運用している (Ishii *et al.*, 2005 ; 平原, 2006).

客観解析は, 3 次元変分法を採用しており, 第

一推定値には NOAA/NODC の気候値の 2001 年版 (WOA01 ; Conkright *et al.*, 2002b) を用いている. 変分法の評価関数の背景誤差共分散行列, 観測誤差共分散行列の作成には, WOA01 の標準偏差を使用している. COBE-SST を使用するにあたっては, COBE-SST の 1961 年から 2000 年までの長期平均と WOA01 の気候値の差を差し引くことにより, COBE-SST の長期平均値を WOA01 の気候値に合わせた上で使用している.

詳細は, Ishii *et al.* (2003), I2006 を参照されたい. なお, ほぼ同様の手法で塩分の客観解析も実行している. ただし, 海面においては水温とは違い海面塩分解析なるものはないため, 塩分に関しては海面までの解析を行っている.

これに加えて, IK2009 では, XBT に関しては機器の種類や年ごとに分類し, 落下式の時間の 1 次の係数を修正し, MBT に関しては深度バイアスを年ごとに深度の 2 次式で求めて補正を行っている. また, WOA01 のかわりに WOA05 を使用している.

4. 最終解析と速報解析

海洋観測データは, 船が帰港してから通報を行う機関もあるなど, GTS を通じて即時的に入手できるものばかりではない. また, 全球表層水温解析は長期間にわたって解析するため, データの少ない時代を考慮して, 解析対象月の前後のデータも参照する仕様となっている. これらのことから, 速報値を得るために即時的に得られたデータのみを用いる速報解析に加えて, 解析値を確定させるための最終解析を行う. 以下ではそれぞれの解析についての詳細を説明する.

最終解析は, I2006 の手順に従う. すなわち, 観測データは, 月中央の解析対象日 (どの月も 15 日とする) に対して前後 90 日分, 計 181 日分のデータを使用する. 観測データセットは, NOAA/NODC の観測データセット 2001 年版 (WOD01 ; Conkright *et al.*, 2002a)¹, 及び WMO, IOC の共同プロジェクトである GTSP (全球水温塩分プロファイル計画) のもとで NOAA/

¹ IK2009 システム導入後は, WOD01 のかわりに WOD05 を使用.

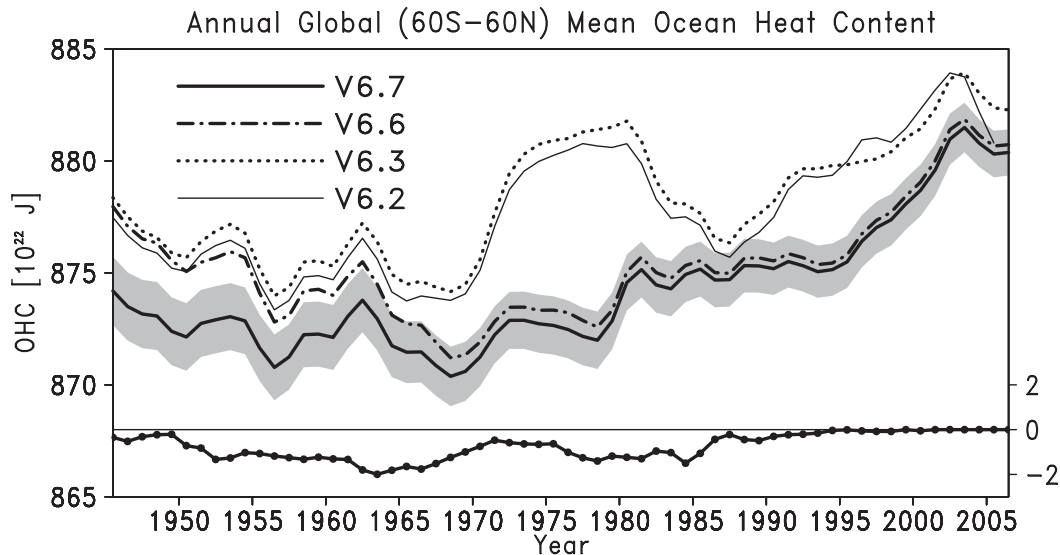
NODC がオペレーショナルにインターネットで提供している GTSP BEST COPY データセット (http://www.nodc.noaa.gov/GTSP/access_data/gtspp-bc.html) を使用している。解析に後 90 日を用いることや GTSP BEST COPY データセットの提供が数か月遅れになることもあって、最終解析は解析対象日の数か月後に実行することになる。

一方、速報解析は翌月実施する予定であり、月中央の解析日に対して前 90 日分とその解析月末までのデータのみを使用する。速報解析は直近の状況の把握のためにのみ運用する。近年の Argo フロートの普及でデータ数が飛躍的に増加し、こうした状況では前 90 日分のみを使用した速報解析と前後 90 日分を使用した最終解析とで結果にほとんど差がないことを確認している。速報解析には、海洋気象情報室が全球通信システム (GTS) を通じて入手したデータ、及び国内機関から電子メール、郵送等の手段によって入手した観測データを用いている。このデータセットは、XBT の機器の種類の情報を持っていないため、IK2009 システム導入後も速報解析では XBT の経年変化す

る高温バイアスの補正ができない。しかし、近年は Argo フロートの増大に伴い、XBT の重要性は相対的に低下しているため、XBT のバイアスによる影響も小さくなっている。

5. 海洋貯熱量への XBT, MBT のバイアスの影響

ここでは、経年変化する XBT, MBT のバイアスの影響について、IK2009 による調査結果を紹介する。第 2 図に全球の表層 700m までの海洋貯熱量の年平均時系列を示す。V6.2 は I2006 の結果で、V6.3 はそれから気候値及び使用する観測データセットをそれぞれ WOA01 → WOA05, WOD01 → WOD05 に変更をしたもの、V6.6 は V6.3 に XBT, MBT のバイアス補正を行ったものである。V6.2, V6.3 で見られた 1970 年代の極大と 1980 年代の極小は V6.6 ではなくなっており、1960 年代以降の上昇トレンドが明確になった。なお、V6.7 は第一推定値としての気候値を、WOA05 から V6.6 の解析値の 1961 年から 2000 年の平均に変更したものである。



第 2 図 全球表層貯熱量 (60S-60N, 0-700m) の年平均時系列 (IK2009 の Fig.7 より転載)
 V6.2: I2006 (解析の気候値及び観測データとしてそれぞれ WOA01, WOD01 を使用, XBT, MBT バイアス補正なし),
 V6.3: V6.2 に WOA01 → WOA05, WOD01 → WOD05 としたものの,
 V6.6: V6.3 に XBT, MBT のバイアス補正をしたもの。下段は V6.6 における MBT の補正の影響。
 V6.7: V6.6 で第一推定値として用いる気候値を WOA05 → V6.6 解析値の長期平均としたもの。

第2図の下側の曲線は、V6.6におけるMBTの補正の影響（スケール右側）を表しているが、1970年代の極大、1980年代の極小の解消にはMBTよりXBTの補正の方が影響したことが分かる。すなわち、見かけの数十年規模変動に主に寄与しているのはXBTであったということになる。ただし、1951年から2005年の長期変化傾向にはMBTの補正も影響していて、V6.6では年あたりの表層貯熱量の変化率が $0.105 \times 10^{22} \text{J/年}$ であるのに対し、MBT補正なしV6.6では $0.075 \times 10^{22} \text{J/年}$ となっている。1990年代後半以降は、MBTの観測はほぼ皆無であるため、MBTのバイアス自体がどうであれ、その影響は少ない。

なお、1970年代の極大と1980年代の極小、といった数十年規模変動の解消、若しくは縮小は、XBTのバイアスの補正を実施している各国の結果に見られている (Levitus *et al.*, 2009; Wijffels *et al.*, 2008; Gouretski, 2009)。

6. 海洋貯熱量への一部のArgoフロートの低温バイアスの影響

2007年の第8回アルゴ運営チーム会合で、ウッズホール海洋研究所が製作しているSOLOフロート (FSI社センサー搭載) の圧力に負のオフセットが見つかったことが報告された。このオフセットにより、水温の観測値が実際よりも浅い深度のものとして通報され、水温が低めに出ってしまうため、当面はこのフロートのデータを使用しないことが勧告された。この影響を確認するため、海洋気象情報室で現在試験運用しているI2006のシステムで、GTSP BEST COPYを使用した解析 (解析A) と、GTS、国内機関から電子メール、郵送等の手段によって入手したデータを使用した解析 (解析B、前後90日分のデータを使用したこと以外は速報解析と同じ) を比較した。解析AではGTSP BEST COPYデータセットを使用しているため水圧オフセットのあるフロートのデータは相当程度除かれているが²、ここでの解析B

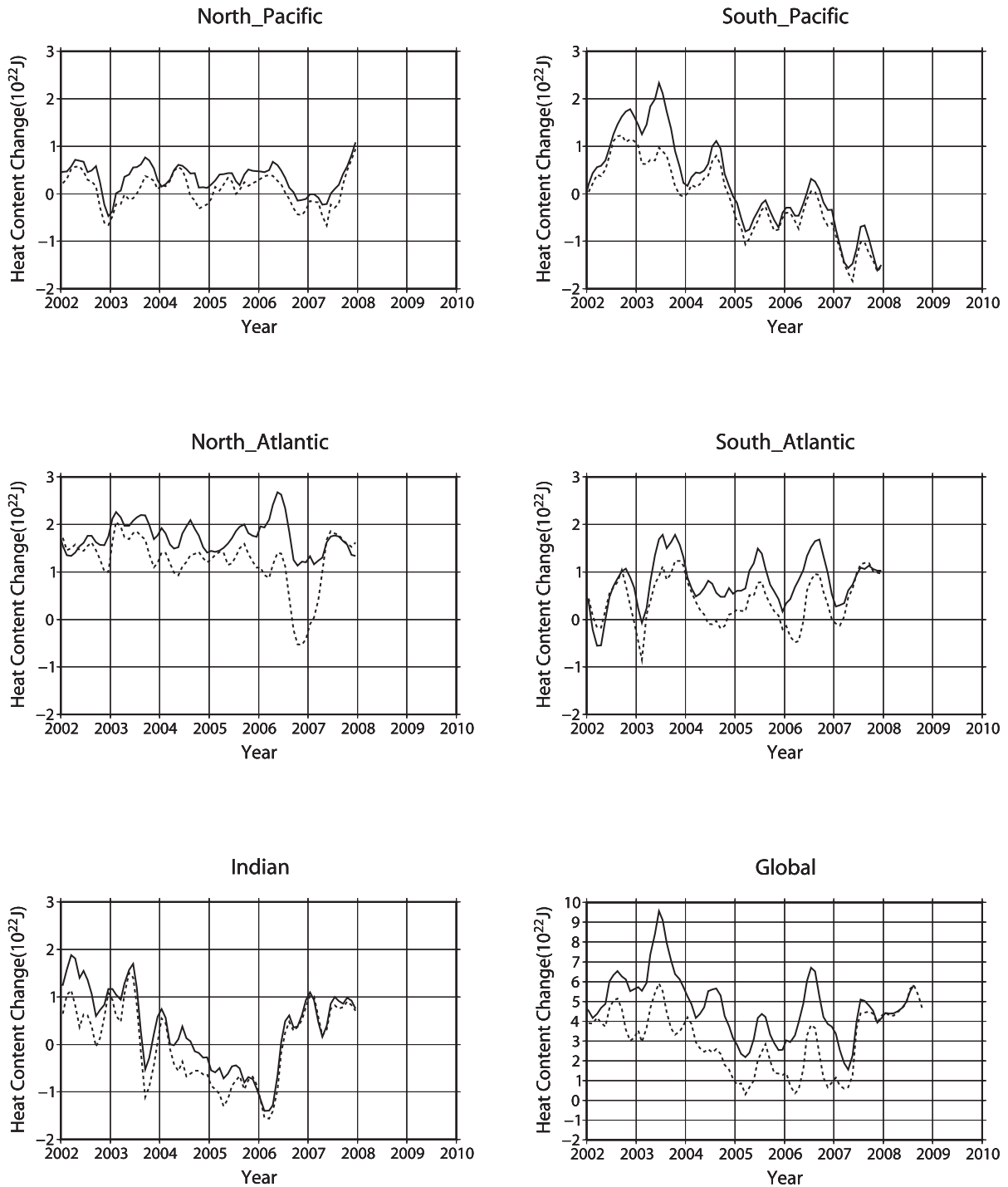
はこうしたデータを除いていない。

第3図は、南北太平洋、南北大西洋、インド洋、全球で解析A (実線) と解析B (点線) による表層貯熱量の偏差を比較したものである。南北大西洋では2004年から2007年初めにかけて、解析Bでは解析Aにくらべ低温となっている。Argoフロートが普及し始めたころから低温傾向が始まっており、また、FSI-SOLOが集中して投入された南北大西洋でその傾向が顕著であるため、この傾向はFSI-SOLOの影響を反映したものとみられる。しかし、最近では、解析Aと解析Bの結果の差はほとんどなく、GTSで流通しているデータから上述のFSI-SOLOのように観測に異常のあるフロートのデータが除かれてきていることが分かる。なお、全球で見ると、2003年以前も解析Aと解析Bの結果が大きく食い違っているが、Argoフロートの普及以前はGTSのデータがGTSPのデータの半数程度であったことが要因と考えられる。2004年以降、Argoフロートの普及で、リアルタイムで流通するデータの割合が飛躍的に増加したため、この要因による解析Aと解析Bの差はほとんどなくなったと考えられる。

7. おわりに

IPCC第4次報告書で取り上げられたように、全球表層水温解析は、海洋貯熱量の変化、海洋の熱膨張を評価することができ、気候システムの変化をモニターするための重要な指標を与える。最近のDomingues *et al.* (2008) の研究結果では、火山の噴火を含めた気候モデルのシミュレーション結果 (インドネシアのアグン山の1963年の噴火、メキシコのエル・チチョン山の1982年の噴火、及びフィリピンのピナツボ山の1991年の噴火では、火山灰エアロゾルによる地上への太陽放射の減少によって、貯熱量、熱膨張の低下が見られるシミュレーション結果となっている) と一致する解析結果が得られている。今後、気候研究において、長期にわたって全海洋をカバーする格子点値

² Argoフロートのブラックリストは随時更新されているが、最近、追加フロート数はゼロに近づいている。ただし、本調査で用いたGTSP BEST COPYデータは、過去に取得したのものも含まれるため、若干、低温バイアスデータも含まれている。



第3図 表層貯熱量偏差 (0-700m) の時系列 (気象庁の I2006 システム による)

それぞれ北太平洋 (左上), 南太平洋 (右上), 北大西洋 (左中), 南大西洋 (右中), インド洋 (左下), 全球 (右下) を示す. 実線: 解析 A (最終解析と同じ), 点線: 解析 B (前後 90 日分のデータを使用すること以外は速報解析と同じ). 南北大西洋の解析 A, B の差異は, 低温バイアスの Argo フロートデータの使用の有無に起因するとみられる.

としての全球表層水温解析の重要性がますます大きくなるとみられる。

これまで、数十年規模変動のような気候変動の解析では、海洋については海面水温の長期解析の利用が主体であった。しかし、気候システムの変化において、海洋表層の果たす役割は大きなものであり、今後は、大気と海洋表層の変動をともに考慮した解析が重要とされるようになるであろう。海洋気象情報室でも、平成 22 年度以降、海洋の健康診断表の診断コンテンツとして全球表層水温解析の結果を気候学的観点から分析したものを毎年発表し、さらには海洋のデータバンクコンテンツとして全球表層水温分布図（速報解析）を毎月提供していく予定である。ただし、詳細については今後検討していく必要がある。

全球表層水温解析においては、観測機器の特性の把握、観測値の品質管理が重要である。XBT、MBT の補正にしても、具体的な補正方法についてははまだ議論が続いており、今後改良される可能性がある。また、海洋観測データには、すべてのデータが収集されるまでに時間がかかるものもあり、Argo フロートのように最終的な品質管理完了まで時間がかかるものもある。こうした事態に柔軟に対応する必要があり、システムの改良、最終解析の再解析の実施体制も検討していきたい。

参 考 文 献

- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quere, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley and A. Unnikrishnan (2007) : Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: 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.
- Conkright, M.E., J.I. Antonov, O. Baranova, T. P. Boyer, H.E. Garcia, R. Gelfeld, D. Johnson, R.A. Locarnini, P.P. Murphy, T.D. O'Brien, I. Smolyar, C. Stephens (2002a) : World Ocean Database 2001, Volume 1: Introduction. Ed: Sydney Levitus, NOAA Atlas NESDIS 42, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 167 pp.
- Conkright M. E., R. A. Locarnini, H. E. Garcia, T. D. O'Brien, T. P. Boyer, C. Stephens, and J. I. Antonov (2002b) : World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, 17 pp.
- Domingues, C.M., J.A., Church, N.J., White, P.J., Gleckler, S.E., Wijffels, P.M., Barker, and J.R., Dunn (2008) : Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea level rise. *Nature*, 453, 1090-1094.
- Gouretski, V and K.P. Koltermann (2007) : How much is the ocean really warming? *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01610, doi:10.1029/2006GL027834.
- Gouretski, V. (2009) : Instrument-related temperature biases and their impact on estimation of long-term ocean temperature variability., submitted. (<http://www.aoml.noaa.gov/phod/goos/meetings/2008/XBT/2008VG.pdf>, accessed 2009-11-27)
- Hanawa, K., P. Raul, 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.
- 平原翔二 (2006) : 気候解析のための海面水温客観解析システムの現業化. 平成 17 年度季節予報技術検討会資料, 61-62.

- Ishii, M., M. Kimoto, and M. Kachi (2003) : Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 51-73.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto (2005) : Objective Analyses of SST 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. Iwasaki (2006) : Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, 62, 155-170.
- 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.
- 気象庁 (2006a) : 海面水温. 海洋の健康診断表総合診断表第 1 版, 23-31.
- 気象庁 (2006b) : 北太平洋の海面水温・表層水温. 海洋の健康診断表総合診断表第 1 版, 71-82.
- 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, and 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.
- Lyman, J. M., J. K. Willis, and G. C. Johnson (2006) : Recent cooling in the upper ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18604, doi:10.1029/2006GL027033.
- Wijffels, S. E., J. Willis, C. M. Domingues, P. Barker, N.J. White, A. Gronell, K. Ridgway, 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) : Interannual variability in upper-ocean heat content, temperature and thermosteric expansion on global scales. *J. Geophys. Res.*, 109, C12036, doi:10.1029/2003JC002260.
- Willis, J. K., J. M. Lyman, G. C. Johnson, and J. Gilson (2007) : Correction to "Recent cooling of the upper ocean". *Geophysical Research Letters*, 34, L16601, doi:10.1029/2007GL030323.
- Willis, J.K., J. M. Lyman, G. C. Johnson, and J. Gilson (2009) : In situ data biases and recent ocean heat content variability. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 846-852.