

306 : 405 : 502 : 13 (海面水温 ; 海洋表層水温 ;  
神戸コレクション ; 客観解析)

## 2. 歴史的海洋観測データに見る海洋気候の変化と データ同化による20世紀気候再現

石井 正 好\*

### 1. はじめに

これまでに、50年から150年に亘る歴史的な海洋観測データを用いて海面水温、海上気象要素、海洋表層水温および塩分の格子点データを客観的に作成してきた。海面水温と海上気象要素の客観解析データベースには、当時整備が進められていた日本発の歴史的観測データセット「神戸コレクション」にちなんでCOBE (Centennial in-situ Observation Based Estimate of variability of SSTs and Marine-Meteorological variables ; Ishii *et al.* 2005) という名称を与えた。そもそも、エルニーニョの監視と予測や季節予報などの気象庁における現業的な要請があって作成にとりかかったものではあるが、作成されたデータが気候研究における基礎的なデータとして「活躍」している現状は、近年の気候研究において海洋観測データが重要視されていることを反映していると考えられる。

拙稿では、このような歴史的海洋客観解析データを簡単に紹介し、格子点値化された海洋観測データを用いた気候研究について述べ、最後に我々が行っている近未来気候予測研究での上記データの役割について述べる。

### 2. 歴史的海洋観測

我々が用いた観測データは、世界的な協力のもとに精神的に収集されているもので、海面水温データを含む海上気象要素データはICOADS (International Comprehensive Ocean and Atmosphere Data Set) と称されるもの、表層水温塩分データは、米国NODCが編集しているWorld Ocean Data (WOD) および

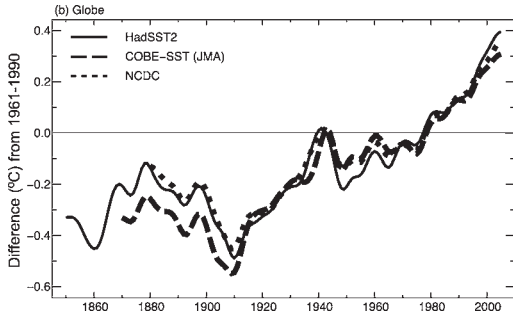
準リアルタイムデータであるGTSPというものである。ICOADSには、1890~1960年まで商船や日本海軍により世界中の海で観測して得たデータ「神戸コレクション」(Manabe 1999) も含まれる。

海洋観測データを世界的に共通の手法によって観測であるが、歴史を遡ってみれば、このような観測の国際的協調体制は、今からおよそ150年前の1853年のベルギーのブリュッセルで開催された「海洋会議 (Maritime Conference)」を皮切りに整備された。この会議の目的は大西洋を航行する船舶の安全を確保するために、観測方法やデータ収集法の取り決めをし、データの相互利用を実現するというもので、米国海軍のMatthew F. Mauryを中心に会議は運営された。この海洋で最初に実現された国際的観測体制の理念は、その後の、WMOの前身であるIMO (International Meteorological Organization) の設立に際して大きな影響を与えた。

このような背景のもとに歴史的な観測データは蓄積されてきているが、観測方法の変遷や戦争などの影響により、長期に亘って一定の品質を観測データに求めることはできない。岡田武松の「測候精神」(手近なところで柳田邦男著「空白の天気図」新潮文庫)にあるように、観測に対する当時の観測者の意識は高かったろうとは想像するが、技術的な未熟さがあったことも否めない。先人の遺した様々の情報を元に、時間で一樣な品質を実現する努力が現代の研究者には求められている。つまり、なにがしかの歴史的事実にもとづき、観測データに必要な補正を加えて利用するということになる。一例を挙げると、第二次世界大戦の前後で、従来、バケツ採水による観測が主であったものが、船内に取り込んだエンジンの冷却用の海水の温度を計測したもの(インテイク法)に置きかえられた。

\* 海洋研究開発機構 / 気象庁気象研究所。

© 2010 日本気象学会



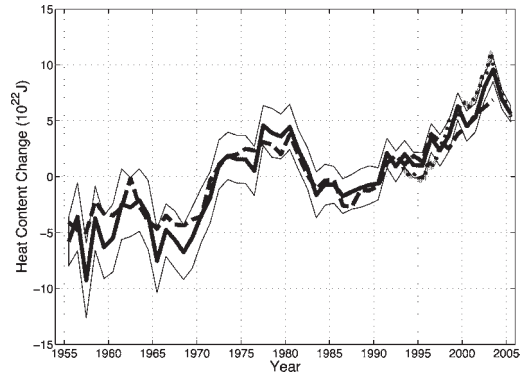
第1図 全球平均海面水温偏差の時系列. COBE-SST (破線) と、ハドレーセンターの HadSST (実線) と米国 NOAA の国家気候データセンター (NCDC) の解析 (点線) との比較. IPCC 第四次報告書より引用.

季節や海域に、さらには年代にもよるが、後者の方が、 $0.5^{\circ}\text{C}$ 前後高い。近年ではインテイク法が主流であるため、バケツ採水のデータに補正を施す補正方法が主流で、いくつかの方法が提案されている (Folland and Parker 1995; Smith and Reynolds 2002)。こうした修正を施して海面水温解析を実施することで、第二次世界大戦前の低温バイアスを除去した海面水温の時系列が得られる (第1図)。この時系列は、海洋の温暖化を示す観測的事実として、広く引用されていることは周知のとおりである。

### 3. 客観解析

上述した観測要素固有の品質管理をするための諸手続きを経て、要素共通の品質管理手続きを施し、近年の客観解析理論に基づく、最適内挿法から変分法などの解析手法を適用して、時空間に散在する観測データから格子点データを作成する。基本とした時空間解像度は、全球 $1^{\circ}$ 度 $\times 1^{\circ}$ 度で、月平均である。海面水温は、1850年からの現在まで、表層水温は1945年から現在までである。品質管理や客観解析の詳細は本報告では割愛するので、Ishii *et al.* (2003), Ishii *et al.* (2005), Ishii *et al.* (2006) を参照されたい。

我々の客観解析では、解析結果の高度な利用ができるように、解析場と同時に解析誤差も同時に計算している。観測が様々な状況で実施されていることから誤差の絶対量を正確に議論するのは困難であるので、客観解析では予め想定した各格子点での誤差が客観解析によってどれだけ減少したかを示す量として解析誤差



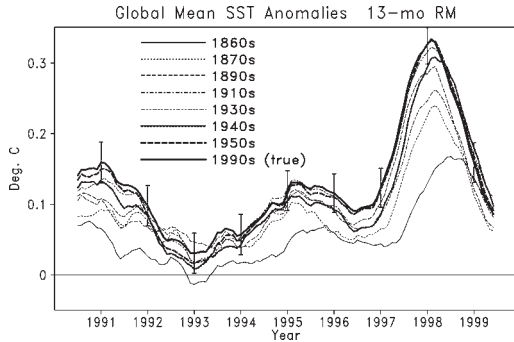
第2図 全球平均海洋貯熱量の時系列. Levitus *et al.* (2000; 実線), Willis *et al.* (2004; 点線), Ishii *et al.* (2006; 破線) の3センターの解析の比較. 陰影は Levitus らの解析の推定誤差. IPCC 第四次報告書より引用.

を定義している。したがって、推奨する使用方法としては、そのまま相対量として使用するか、適当な年々変動の標準偏差などを乗じて絶対誤差を与えるという方法である。この解析誤差を用いることで、計算の手間がかかるが、領域平均値についての誤差を求めることができる。

第2図には、3センターで行われた表層水温解析に基づく海洋貯熱量の時系列が示してある。それぞれ異なる解析方法を採用しているにもかかわらず、結果は互いに良く一致している。図では鉛直積算した物理量の全球平均を比較しているために、解析方法の差異は見えにくい。局所的な変動やエルニーニョイベント時の再現性などは解析方法に依存する。

### 4. 解析結果の不確実性に関わる考察

古い年代になるほど観測データは乏しくなり、この影響が解析結果の信頼性をどれだけ低下させるかという興味深い疑問が持たれる。解析誤差を計算してはいるもののいまひとつ情報が乏しいので、歴史的客観解析値の信頼性についての考察に、cross validationなる手法を導入することにする (福田・石井 2005; Ishii and Fukuda 2005)。手法の概略は次の通り。1) 観測データの豊富な1990年代の解析値を真値とする、2) 1990年代の観測データから、過去の各年代の観測分布に対応する観測データを作成する (擬似データ)、3) 擬似データを用いて各年代に相当する客観解

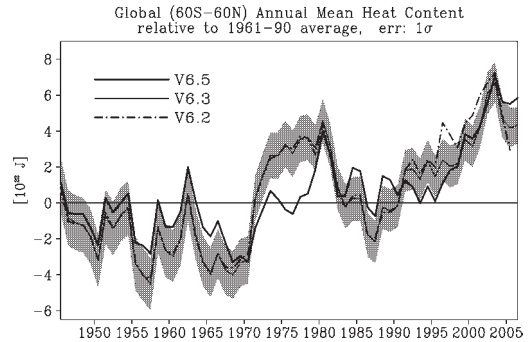


第3図 cross validationによる、各年代における全球平均海面水温偏差の不確実性. 詳細は本文を参照.

析を行う(擬似解析),そして最後に1)の真値と比較してその差について議論する.この結果,全球平均の海面水温偏差については第3図に示したとおりである.1870年以降の全球平均水温は概ね現時点での観測データで再現できるが,1860年代の海面水温については厳しいことが分かる.全球平均値は観測データが多少乏しくても再現すると期待できることが確認された.エルニーニョ監視領域(Nino-3)の平均海面水温でも同様の結果となっている.面積の大きな低緯度での解析ができていくかどうか,全球平均水温の再現にとっては重要であろう.

観測データの系統誤差の問題の解決が歴史的観測データを取り扱う上で重要であることを指摘したが,大きな不確実性を解析結果にもたらす例を最近の話題からひとつ挙げる.

海洋表層水温観測の中でもXBT(Expendable BathyThermograph)観測には何かと問題が多い.XBT観測では,観測水温の深度は実際に計測されず,XBTのプロープの水中落下した時間の関数(落下式)で与えられる.そもそも,XBT観測は,潜水艦の安全航行のために,簡便に水温プロファイルを得る手段として開発,利用されてきたもので,気候研究に採用されることなど,当時の,観測者,XBTメーカーの問題意識にはあまりなかったようである.しかしながら,その簡便さ故に普及し,1960年代の終りから1990年代まで海洋観測点数では全体の半数以上を占める観測となった.したがってXBT観測にながしかの問題があるとすると,その影響は甚大である.実際に問題はあって,その最初の手当は,Hanawa *et*



第4図 全球平均海洋貯熱量偏差の時系列. XBTの深度補正をしない場合(V6.3)と施した場合(V6.5). V6.2はIshii *et al.* (2006)で,V6.3とV6.5では最新の観測データ(WOD)を使用している.陰影は推定誤差の一標準偏差を表す.

*al.* (1995)によってなされた.彼らはXBTの観測深度が低めに与えられているとして,それを修正した落下式を提案した.ところが最近になって,XBTの観測データには他の精度の高い観測と比較して高温バイアスがあり,その大きさは歴史的に変化していると報告された(Gouretski and Koltermann 2007).この高温バイアスもXBTの深度の問題に帰着し,筆者らの計算でも,問題の高温バイアスを説明できる正の深度バイアスが検出された.さらに,このバイアスを除去して海洋の貯熱量を再計算してやると,第4図に示したとおり,とりわけ1970年代から1980年代の全球平均貯熱量の時系列は大きく様変わりする(Ishii and Kimoto 2009).つまりXBTの深度補正により,10年規模変動の振幅が小さくなってしまった.現在,この問題は世界的に議論が行われており,現時点での我々の結果にも修正が施される可能性はある.

## 5. 客観解析データの応用

こうして得られた歴史的海洋客観解析データベースの活用範囲は広範である.

元来,気象庁での現業利用を企図していたことから,現在,エルニーニョ予測や季節予報,そして海況監視の現場で利用されている.また,海面水温解析値は,世界で3番目に作成された日本の大気再解析データ,JRA-25(Onogi *et al.* 2007)の境界データとして活用された.

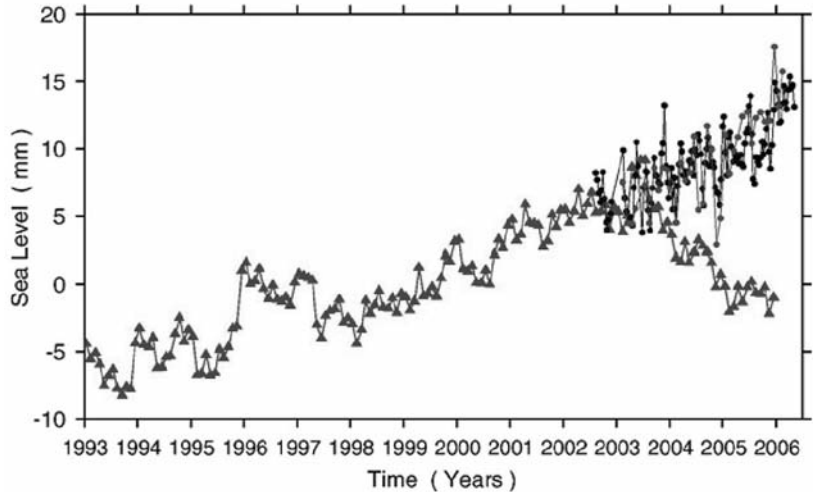
長期的な観測事実を反映しているとして,第1,2

図に示したとおり、海面水温の時系列や海洋貯熱量の時系列は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第四次報告書で、他機関の結果と対比させて引用されている。

海洋の表層水温データは、海洋の水温変動の解析もさることながら、海面水位変動に関連する研究コミュニティで注目されている。海面水位を研究対象とする研究領域は広範で、地球温暖化による水位上昇についての研究領域から、衛星海面高度データ解析、古気候、過去の地殻変動を再現する固体系分野にまで至る。

フランスの国立宇宙研究センター (CNES) では、Anny Cazenave を中心に、衛星データを用いて海面水位変動の解析を精力的に進めている。彼女らは、最近の15年程度の海面高度の変動に影響を与えたと考えられる、海面の熱膨張と淡水の流入について量的な評価を行い、近年地球温暖化による水位上昇が加速している事実を浮き彫りにした。彼女らの一連の研究で、衛星観測データから熱膨張による変動を求めたものがある。ここでは熱膨張分を、水位の全変動から淡水の流入分を差し引いたものとして定義している。淡水の流入量の相対量は重力場の変化を観測する衛星 GRACE を解析することで得られる。このようにして計算された熱膨張による水位と我々の表層水温観測からもとめた水位とを比較したのが、Lombard *et al.* (2007) による第5図である。衛星の観測による熱膨張効果は水位上昇のセンスで、海洋表層データの水位は低下しているという、全く逆の結果が得られた。CNES チームのこの指摘は海洋観測データに関わる研究にとって重大なものである。

この問題についてこれまでに分かっていることが2点ある。1つは、一部の Argo データに、圧力センサーの不具合による低温バイアスがあったこと ([http://www-argo.ucsd.edu/Acpres\\_offset2.html](http://www-argo.ucsd.edu/Acpres_offset2.html))、もう1つは、既述した XBT の水温バイアスの問題が、近年 XBT の観測データが減少しているために、



第5図 全球平均した熱膨張による水位変動の時系列。▲を付した実線は海洋表層水温観測に基づくもの。●付きの実線は衛星観測から推定した海洋への淡水移入による水位変動で、2002年以降の期間のみデータが存在する。2つの異なるアルゴリズムで推定した淡水移入量が●付きの黒と灰色の実線で示されている。Lombard *et al.* (2007) より引用。

該当期間においては水位が見掛け上低下しているように見える (Ishii and Kimoto 2009), ということである。これらを補正した結果は第4図に示したものである。それぞれの問題の全球平均にもたらす影響は同程度であった。依然として衛星のような熱膨張による水位上昇が明瞭に見られない。この理由の1つとして、最近報告された Argo の低温バイアスの問題 (Uchida *et al.* 2008) があるのかもしれない。

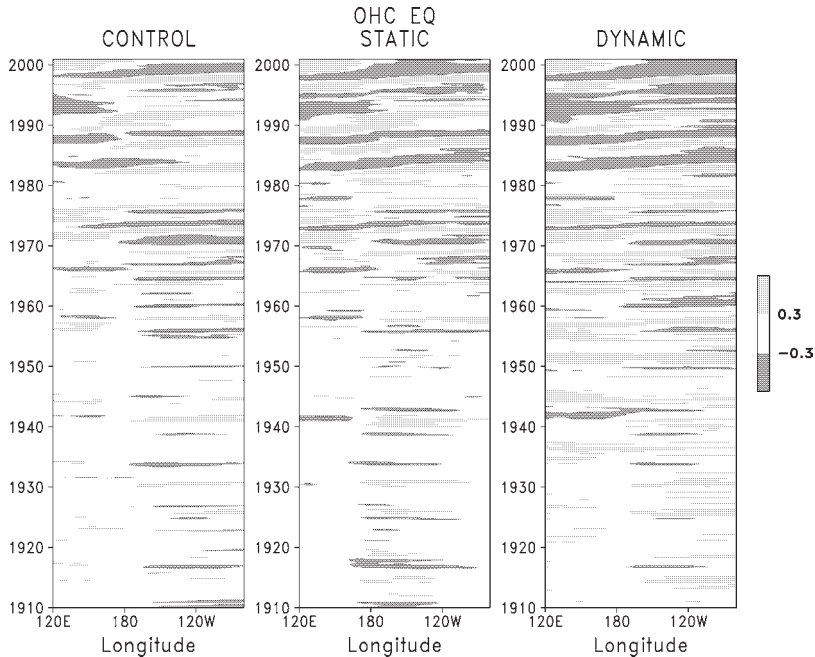
客観データが広範な研究分野で活用されることにより、海洋観測データの問題がひとつずつ解決されていくものと期待している。

## 6. 20世紀気候再現の試み

整備した2つの客観解析データベースを用いて20世紀の気候、とりわけ海洋内部の変動を再現する試みを行う。表層水温や塩分の客観解析データは既に得られているが、海洋内部の観測データが乏しくなる1960年以前は、広範囲の海域で気候値以上の情報を持っていない。そこで力学モデルを併用するデータ同化を活用する。

最初の歴史的な海洋データ同化の試みでは、COBE から海洋モデル駆動する大気の外力を計算した。使用した海洋モデルの解像度は、北極海を除く全球2.5度 (経度) × 2度 (緯度) である。比較のために、データ





第6図 赤道に沿う海洋貯熱量偏差の時系列. 詳細は本文参照.

同化積分 (DYNAMIC) に加えて観測データを用いないモデル積分 (CONTROL) も併せて行う. 第6図には, 左から CONTROL, STATIC, DYNAMIC による赤道での海洋貯熱量偏差を, 1910年から2000年までのものについて表示している. STATIC はモデルを使用しない客観解析のことである. 図中,  $-0.3^{\circ}\text{C}$ 以下と $0.3^{\circ}\text{C}$ 以上の偏差を, それぞれ, 濃い陰影と薄い陰影で表示した. 概して, CONTROL 実験による低緯度赤道域のエルニーニョの再現性は高く, 100年間の Nino-3の月平均海面水温偏差は, COBEのものと同相関係数0.8, RMSE $0.5^{\circ}\text{C}$ で対応しており申し分ない. しかしながら, 中高緯度における再現性は芳しくなく, 加えて観測から求めたフラックスには問題が多く, これにより同化モデルの気候ドリフトが誘発される傾向が見られた. COBEのプロダクトに立ち返って問題の見直しをする必要がある.

2つめの試みは, 2007年度から文部科学省が推進する「21世紀革新プログラム」で地球温暖化の条件の下で30年先の気候変動予測を行う野心的なプロジェクトで使用される予測システムへの応用である. この近未来予測プロジェクトには, 東京大学大気海洋研究所(旧気候システム研究センター), 海洋研究開発機構,

国立環境研究所が参加し, 研究体制が展開されている. プロジェクトで開発されるシステムでは, 大気と海洋を結合した状態で主に海洋データ同化をして, 数十年規模変動の再現と予測に焦点を当てる. 将来の予測ではあるが, 過去50年程度の期間についての検証実験を元に, 将来予測のための基盤は構成されていなければならない. そのためには, 上で重ね重ね紹介した客観解析スキームや海面水温と海洋表層水温・塩分客観解析データベースが有効に活用されることは言うまでもない.

## 7. 結びにかえて

時空間に散在する海洋観測データを, 人間が理解しやすい格子上に纏めたデータとして加工することそのものには科学的な新規性は乏しいが, そのようなデータベースをきちんと管理することにより, 新しい気候研究の展開は容易になる. 最後に紹介した近未来予測プロジェクトは, まさに, そうであり, 同プロジェクト立ち上げに際しては, これまでの研究資産を最大限に活用した. また, どのように高度な客観解析方法をもってしても, 観測データへの理解なくしては, 良質の解析結果を得ることができないことにも留意すべきであり, 気候研究は良質の観測データを整備することから始まることを念頭に置いて進めるべきであろう.

## 参考文献

- Folland, C. K. and D. E. Parker, 1995: Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 319-367.
- 福田義和, 石井正好, 2005: 歴史的な海面水温客観解析値の cross validation による品質評価. 日本気象学会 2005年度春季大会予稿集, P117.
- Gouretski, V. and K. P. Koltermann, 2007: How much is the ocean really warming? *Geophys. Res. Lett.*,

- 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 TSKT-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBTs). *Deep Sea Res.*, **42**, 1423-1451.
- Ishii, M. and Y. Fukuda, 2005 : Cross validation of the COBE products. 2nd International Workshop on Advances in the Use of Historical Marine Climate Data (MARCDAT-II), 20th October 2005, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, Exeter, U. K., 30.
- 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., 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 sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20<sup>th</sup> 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.*, **61**, 155-170.
- Levitus, S., C. Stephens, J. I. Antonov and T. P. Boyer, 2000 : Yearly and year-season upper ocean temperature anomaly fields, 1948-1998. NOAA Atlas NESDIS40. (Available from ftp : //ftp.nodc.noaa.gov/pub/data.nodc/woa/PUBLICATIONS/nesdis40.pdf).
- Lombard, A., D. Garcia, G. Ramillien, A. Cazenave, R. Biancale, J. M. Lemoine, F. Flechtner, R. Schmidt and M. Ishii, 2007 : Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **254**, 194-202.
- Manabe, T., 1999 : The digitized Kobe Collection, Phase I : Historical surface marine meteorological observations in the archive of the Japan Meteorological Agency. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 2703-2715.
- 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.
- Smith, T. M. and R. W. Reynolds, 2002 : Bias corrections for historical sea surface temperatures based on marine air temperatures. *J. Climate*, **15**, 73-87.
- Uchida, H., T. Kawano and M. Fukasawa, 2008 : In-situ calibration of moored CTDs used for monitoring abyssal water. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **25**, 1695-1702.
- 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.