

歴史的海洋データを用いた気候変動の監視と予測

—2010年度堀内賞受賞記念講演—

石井 正 好*

1. はじめに

2010年10月、京都で開催された気象学会秋季大会において、「歴史的海洋表層水温解析データセットの作成およびそれを用いた気候変動の監視と予測への貢献」という理由で堀内賞を戴きました。この度の関係者のみなさまの御尽力に対して、心より感謝申し上げます。気象学会への貢献は大きい方ではないと考えておりますので、今回の受賞は大変恐縮しております。これから、このテーマの研究をさらに発展させていくことで、わずかばかりでも恩返しができると思います。

私がこれまでに行ってきた、歴史的海洋表層水温解析データや歴史的海面水温データが、様々な学問分野で広く活用されるようになったことは、データ作成にとりかかった1990年代の中頃には想像もつきませんでした。学問の進展と地球温暖化に伴う地球環境への意識の高まりが背景にあって、後回しになっていた海洋の役割に注目が当てられるようになったものと考えています。以下、このあたりの話の一端を紹介させていただきます。

2. ことの発端

今でこそ、適当な気候モデルが手元があれば、気候予測の真似事が簡単にできますが、1990年代というのは、そうではありませんでした。

1992年に、それまで本本昌秀さん（東大気海洋研究所、所属は2011年末のもの、以下同じ）と吉川郁夫さん（気象庁気候情報課）が取り組んでいた全球海洋

データ同化ならびに大気海洋結合モデルによるエルニーニョ予測システムの開発に、一緒に関わることになりました (Kimoto *et al.* 1997 ; Yoshikawa *et al.* 1995 ; Ishii *et al.* 1998)。一通りの開発を終えて、気象庁気候情報課の現業業務としてこのシステムをベースにしたエルニーニョの監視と予測が、それぞれ1995年から、1999年から開始されました。新しいツールとしての気候モデルの開発も大事なことでありましたが、エルニーニョ予測の精度を正當に評価するための開発インフラが十分に整備されていない実状がありました。例えば、気候モデルを初期値化するときの海面水温と監視に使用する海面水温には、特性の大きく違うものが使用されていました。均質性の高い大気再解析データなどは、高嶺の花でした。現業的に大気客観解析が行われていたので再解析データに相当するものがありました。しかし、良く知られているように、短期予報精度を上げるために大気モデルには年々変更が加えられます。このため、手持ちの大気客観解析データは大気モデルの変更履歴を含んだデータとなってしまっています。過去の長期間のエルニーニョのイベントについて同化・予測システムを評価することでシステムの優劣が判断されますが、こういった目的のために上記のような大気データを使用した際には、より注意深く結果を評価しなければなりません。そして、さらに致命的なことに、1988年11月からしかデータが無く、1982/83年の大規模エルニーニョや翌年のラニーニャについてシステムの評価実験をすることができませんでした。

上記のような状況下で、エルニーニョ予測の精度を高めるためのシステム開発をこのまま続けていく空しさを感じておりました。

1994年に気象研究所から東大に移った本本さんは、若い研究者を捕まえては、「無いものは自分で作りな

* 気象研究所／海洋研究開発機構。

—2011年11月21日受領—

—2012年4月23日受理—

さい」としきりに論しておられました。気象の研究をするのに自分でコンターを描くコンピュータプログラムを作ったり、プロットへ送るコマンドの間違いにより紙に穴を空けてしまうほどのバグをプログラムに埋め込んだ失敗を経験した世代の言葉と理解できます。自分で何でもやってみないと気が済まない性分と、「無いものは自分で作れ」に背中を押されて、気候モデルを開発しやすいように開発環境を改善しようと思ひ立ちました。1998年のことでした。

折しも、第一次世界大戦前後の、海面水温を含む海上気象データであるところの神戸コレクションがデジタル化される(Manabe 1999) ころでした。さしあたり海面水温データの改良が急務でしたので、これに便乗するように始めました。小司晶子さん(札幌管区気象台)、杉本悟史さん(気象庁)、松本隆則さん(気象衛星センター)が協力してくれました。時をほとんど同じくして、表層水温の歴史的解析データの整備も木本さんと可知美佐子さん(宇宙航空研究開発機構)とともに始めました。

このころ、気象庁の業務として2、3度海外の研究集会に参加させてもらいました。必然、世界も意識しました。海洋の歴史解析をまず踏台にして、簡単な大気の再解析をやる、気候の問題解決のためには、100年以上の海洋解析データが欲しいので、海洋のデータ同化でそれを準備する、その上で世界一の気候予測システムを作るという大いなる野望を持ちました。が、凡人ですので、現時点までに、そこに到達することはできておりません。大気再解析については、私が心配するまでもなく、しかるべき専門家集団の手によって日本再解析データ(JRA-25)が作成されました(Onogi *et al.* 2007)。このJRA-25では、我々の作成した歴史的海面水温解析データが採用されました。

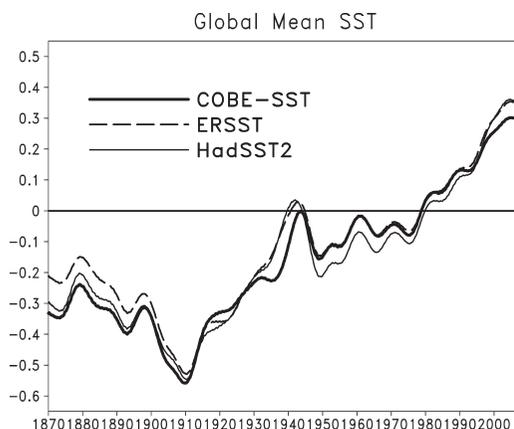
3. COBE

COBEは、観測データに基づく、全球、1度×1度、月平均の格子での、海面水温ならびに海上気象要素の歴史的客観解析データの呼称です。海面気圧、海上風、気温、露点、雲量、海水を対象としました。おしりの方が長くなるのですが、Centennial Observation-Based Estimates of sea surface temperature and marine meteorological variablesを略してCOBEとしています。西洋的には「コービー」と発音される傾向がありますが、「こうべ」と呼びます。

神戸コレクションのデジタル化とともに作業を進めてきましたので、その偉業を風化させないようにとの願いを込めて、「神戸」の音を合わせています。

ここで使用される海上気象観測データは、ICOADS(International Comprehensive Ocean and Atmosphere Data Set; Worley *et al.* 2005)に収められているものです。現在でも神戸コレクションのような過去データの整備が各国で進められており、要素にもよりますが、19世紀半ばから全球的な解析値を求めることができます。海上気象観測データが100年以上もの長期間に亘ってきちんと整備されている背景については、石井(2010)を参照願います。また、地形の影響を大きく受ける陸上データに比べて、海上気象データには、熱的に安定した海上での観測であるため、気候変化のシグナルを抽出しやすいという大きな利点があります(山元 1999)。地球上での長期的な気候変化を見るときに海面水温が利用されるのも、データが古くまで存在することに加えて、このような利点があるためです。COBEの海面水温解析の結果も、気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の第四次報告書へ貢献することができました(第1図)。本稿で紹介する一連の成果の中で、個人的には、これが最も嬉しかったことです。つまり、詳細を述べる余裕はありませんが、COBEの海面水温解析値の作成には相応の苦勞がありました。

COBEでは、歴史的観測データを元に、可能な限り、時空間で均質な格子点値を作成します。このようなデータでは観測データのノイズが除去されていますので、観測データを直接使用するよりも使用しやすいはずですが、また、可能な限り観測データから情報を抽出すべく、月平均の最終製品は、日々の解析を行いそれを平均して求められています。従来のような類似の解析ですと、解析対象月内の全データを用いて、一度に解析される場合が多いですが、この場合、相関のほとんど無いデータが客観解析スキームによって平均され、場合によっては、とある日のデータが月平均値を代表してしまうということも生じてしまいます。海面水温のような持続性の長いデータなら良いかもしれませんが、大気要素はそうではありません。同じ日のデータならば、距離が離れていてもある程度の相関が期待できますので、日別の格子の値を求めて、それを最終的に平均すれば、時間的に偏在する観測データによる解析結果のバイアスも低減できるはずですが。講演では、



第1図 全球年平均海面水温偏差の時系列。COBE-SST (太線)、ハドレーセンターのHadSST2 (細実線)、米国NOAAの国家気候データセンター (NCDC) のERSST (破線) を比較。偏差は1961年から1990年の気候値を元に計算した。時系列はHadSST2で解析データが存在する格子のみの値を使用している。IPCC第四次報告書で採用されている13点のローパスフィルターを掛けて平滑処理を施した。

このようにして作成した日平均解析が1934年9月の室戸台風を良く解像していることを例示しました。

当時は、上記のようにして作成した海上気象データから海洋モデルを駆動する大気外力データを作成して、100年間の海洋データ同化を行う計画でした。

4. 表層水温・塩分データベース

COBEと同様に、海洋表層の水温と塩分の客観解析値を作成しました。海洋表層は、当初は、500mまでを対象としていましたが、その後700mとして現在では3000mまでを対象にしています。海面や海上での観測に比べて、観測機会はずっと少なく、解析対象期間は1945年以降としています。ただ実際に使用に耐えるのは、1950年代末の国際地球観測年 (International Geophysical Year: IGY) を経て海洋の観測体制が整備された1960年代以降のものになると考えています。塩分の観測は、専門の測定器と測定の熟練が必要になるため、歴史的に見ると観測数は極めて少なく、全球的には、気候値を得るのが精一杯です。2003年以降にArgoブイが展開されてから、全球的な塩分の短期変動の描像が可能となりました。

そもそも、表層水温・塩分客観解析データを作成し

たのは、当時開発していた海洋データ同化システムの客観解析部の性能を評価することと、使用する観測データの品質を格子点データにしてモニタするという目的がありました。ここで紹介する表層水温・塩分客観解析では、力学モデルを使用しない、つまりデータ同化は行っていません。データ同化プロダクトには、通常、海洋モデルの系統的な誤差と海洋モデルに与える大気外力の誤差が混入しますので、プロダクトの品質の評価は大変煩雑になります。この意味で、データ同化を行わないプロダクトは、観測データの状態を理解するのに都合の良いものと言えます。さらに、当時の同化出力データは観測データと比べて低品質で、予測データの初期値以外の利用は困難だったと思います。

4.1 観測データのバイアス除去・品質管理

客観解析のための計算機プログラムの大半は、観測データの品質管理に割かれるといっても過言ではありません。一見難しそうな数式で与えられる客観解析コードは相対的に簡潔です。品質管理の重要性を強調するのは容易ですが、実際、データを取捨するのにどのような品質管理スキームにどのようなしきい値を与えるかは悩ましい問題で、経験による判断が大きくなります。試行錯誤しながら得た結論は、「疑わしきは使う」でした。しきい値そのものに確固たる根拠を求めるのは困難だからです。多少バイアスがあっても、観測した自然環境を反映した情報が含まれているかもしれないという期待もできます。様々な苦労の上に観測されたデータなんだから、よほど酷いものでなければ使ってあげるべきという感情的な判断も少しは働いたかもしれません。このような判断をとり入れたことによる大きな不具合はこれまでに見い出されていません。一方で、気候値をベースにした客観解析なので、あまりしきい値を厳しくできない事情はあります。しきい値を厳しくしたために、例えば、今世紀最大のエルニーニョの表現が不味くなることを経験しました。

過去のデータにはそれぞれの要素について特有の事情があります。

ICOADSの場合、海面水温ではバケツ採水海面水温の補正が必要なことは有名です。第二次世界大戦期間は、船外での観測は生命の危険があることから、室内に設置された温度計の値を記録として残したために、高温バイアスが含まれています。これに併せて海上風の風速計の設置高度の補正などありますが、これら良く知られたバイアスについては優れた先行研究が

あります。今回見いだされた1960年以前の露点の高温バイアスについては、一つの補正方法を提案しました (Ishii *et al.* 2005)。

こうしたバイアスの厄介なところは、バイアスのサイズが気候シグナルよりも大きいことです。気候シグナルよりも大きいから補正の対象になっている訳ですが、歴史的データの非常に質の悪い側面です。現在得られている歴史的データに基づく解析結果は信用できるのか、という根源的問題が常に提起されています。観測データの全てのバイアスを、我々は理解している訳ではありません。後程、海洋表層の水温観測に見られた事例について紹介します。

5. 全球平均, 解析誤差, そして ENSO

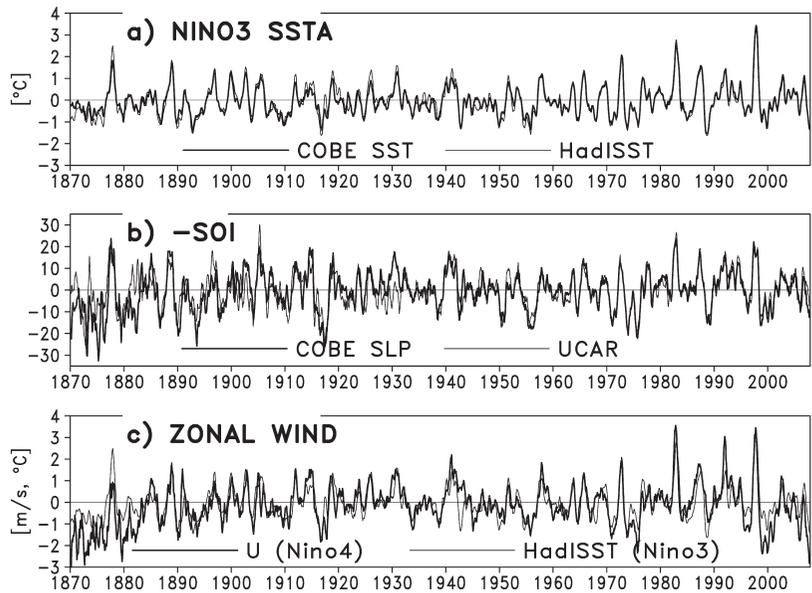
この三つは、客観解析データを作成する際にこだわったポイントです。

先ず全球平均ですが、気候の変化を最も端的に理解できる図ですので、格子点データからしかるべく再現できることが望まれます。一方で、全球平均の長期的な時系列には、上述したバイアスの影響が最も明瞭に現れます。客観解析データベースを作成する過程では、全球や領域平均の時系列を描いてみて、問題がありそうな期間を特定し、元データに当たってバイアス等の問題を特定し、解析結果の改良を行うことを繰り返しました。

次に解析誤差です。解析結果の信頼性の情報としての解析誤差です。例えば、周囲に観測データが少なければ解析値は気候値に近いものになっている、ということが分かる情報です。客観解析データは気候研究のプロが使うものであるから解析結果の信頼性なる情報を付加しなければならない、さらに自身も含めたデータのユーザはその情報を加味して客観解析データ

を取り扱わなければならないと考えました。計算には手間が掛りますが、配布するデータには全て解析誤差の情報を含めることにしました。このようなデータの配布方法は、世界的にみてもまだまだ一般的ではありませんが、近年少しずつ改善されてきているとは思いますが。

信頼性の情報としての解析誤差は重要ですが、これ以外の利用法があります。解析スキームを開発する際に、適切なパラメータ値を求めるために解析誤差を参照することでその明解な根拠を得ることができます。解析結果よりも解析誤差の方がパラメータの変更に敏感に応答するということを利用するわけです。Ishii *et al.* (2003) の Fig.4がその一例です。この特性を利用して、計算の間違いを発見するという経験もしました。最後に ENSO です。言うまでもなく、気候学的に重要な変動ですので、可能な限り正確に表現できればプロダクトの有用性が高まります。幸いなことに、赤道の空間相関距離は長く設定できるので、距離の離れた観測データから格子点値を求めることができま



第2図 上から a) Nino-3 海域 (150°W-90°W, 5°S-5°N) における海面水温偏差, b) 南方振動インデックス (SOI), c) 赤道の Nino-4 海域 (160°E-150°W, 5°S-5°N) で平均した東西風速である。それぞれ、ハドレーセンターの解析結果 (HadISST), 大気研究大学法人 (UCAR) の解析結果, そして HadISST による Nino-3 海面水温偏差を細線で重ね描きしている。SOI では、海面水温偏差の変動に対応するように、符号を反転させている。赤道では海面水温偏差がピークを取る頃、その西側で東西海上風偏差のピークが現れる。

す。このため、1870年ごろの少ない観測データからでも精度良く海面および海洋上の変動を再現することができていると考えています（第2図）。

6. フランスからの便り

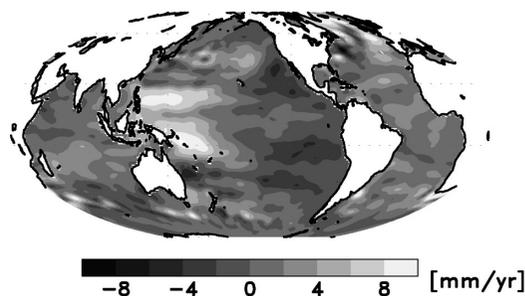
最初の表層水温客観解析に関わる論文 (Ishii *et al.* 2003) が世に出てほどなく、2003年2月14日に、フランスから電子メールが来ました。便りの主はフランス国立宇宙研究センター (CNES) のアニー・カズナーブ (Anny Cazenave) さんでした。彼女は衛星データを用いた水位変動の解明を研究し、全球的な水循環過程を考慮した水位変動収支解析を専門にしています。海面水位変動研究の分野では世界的権威の一人です。メールの用件は、彼女の研究に表層水温データを使いたいというものでしたが、その大変丁寧に記述された文面には感心しました。

このころの私は、海洋100年データ同化の成功を追い求める作業の真っ只中にありましたが、世界では、海面下の水温変動が水位変動にどれだけ寄与するかの理解を進めようとしていました。当時、利用可能な海洋データは、米国海洋大気庁国家海洋データセンター (NODC) のグループが作った年平均水温解析値 (Levitus *et al.* 2000) が唯一で、海洋が温暖化し、これが海面水位上昇にも寄与していることの真偽について確認が出来ない状況でした。すなわち、観測データを使用した研究に宿命的に付きまとう問題なのですが、作成した解析結果を検証するための独立な観測データが無いわけです。海洋のデータは潤沢にはありませんので、海洋のデータ解析ではとりわけこの問題は深刻で、過去数十年に亘る海洋表層の水温場を検証することは容易なことではありません。

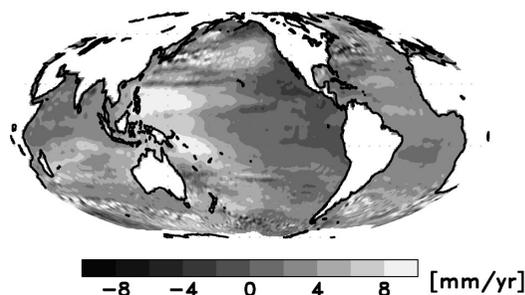
彼女は、互いに解析方法の異なる NODC データと我々のデータを一緒に解析して、長期海洋変動の観測的事実の検証を行いました (Lombard *et al.* 2005)。彼女らのグループは、熱膨張による水位変動が海洋内部の水温変動の正のトレンドに対応して上昇し、NODC と私たちの水温解析値はその時間的空間的な変動特性を含めて良い一致を示すことを報告しました。併せて、衛星による海面高度データの観測との対応が良いことも示しました (第3図)。

海を隔てていても、状況が一変したことが分かりました。我々のデータを要求するメールが断続的に私のところに送られてきました。この状況は原稿執筆時点の今でも変わりません。海洋学的に見ても画期的な出

Thermosteric SL Trend 1993–2009



Satellite SSH Trend 1993–2009



第3図 海水の熱膨張による水位変化の、1993年から2009年までの線形トレンド (上段) と衛星観測による海面高度の線形トレンド (下段)。衛星観測データは仏国 CNES の解析による。

来事だったと考えております。それまで多くの人がそうであるように、われわれも、観測データが乏しい海洋観測から作成した格子点データの利用価値はそんなに高くはないと、たかを括っていたところがあります。しかしフランス人研究者たちは、みごとに、次の扉を開けました。歴史的海洋データは有用、有益であることを示したのです。

私たちの最初の客観解析データベースでは、本稿の後半でも問題として取り上げる、簡易に水温プロファイルを取得できる観測測器である XBT (eXpendable Bathythermograph) の深度補正を一部のデータについて施していなかったために、1990年代以降の全球平均海面水位変化は NODC のものとの対応が良くありませんでした (第4図のバージョン4 (V4) の時系列)。早速、水温解析方法も見直して、解析データベースを更新しました (第4図の V6.2 の時系列; Ishii *et al.* 2006)。後日、欧州地球科学連合2007年会合で NODC のレピタスさんに会ったときには、

「御陰で我々のプロダクトの正当性が証明された」という言葉をもらいました。このとき既に我々の水温客観解析データは世界の主要な研究機関の研究者に使用されておりました。

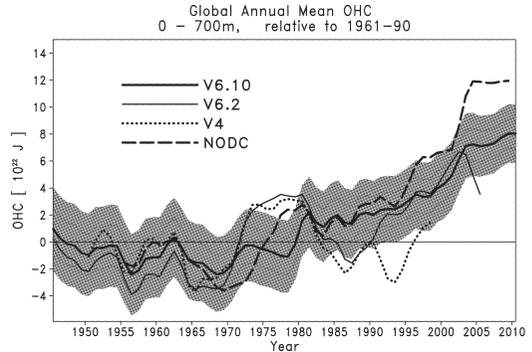
住 明正先生（東京大学サステイナビリティ学連携研究機構）と花輪公雄先生（東北大学大学院理学研究科理学部）の叱咤、激励の言葉の下で2006年の論文を作成し、IPCC第四次報告書に間に合わすことができました。

7. PCMDI チームと海洋寒冷化の謎を追う

IPCC第四次報告書が発刊された2007年には、海洋観測について重要な指摘が二つありました。「海洋が2003年から寒冷化」していることと上述したXBTという簡易水温プロファイル観測測器のバイアスが歴史的に変化していること（Gouretski and Koltermann 2007）の真偽を確かめるといふものでした。

第4図のバージョン6.2（V6.2）の解析結果には、2003年以降海洋が顕著に低温化しているのが示されています。2003年と言えば、漂流フロートを世界的に高密度に配置するArgoプロジェクトが開始された年に符合します。Argoフロートにより、これまでと比べて高精度の観測が期待されていることから、NOAAの研究グループは、寒冷化は自然変動であるという論文を一早く発表しました（Lyman *et al.* 2006）。第4図のV4やV6.2の時系列に示したように私の解析結果でもこの低温化が生じることは確認していました。海外からこの理由についてコメントも求められましたが、残念ながら良く分かりませんでした。

このころ米国のローレンス・リバモア研究所の気候モデル診断・相互比較プログラム（PCMDI）のクリシュナ・アチュラオさん（現インド工科大学）から求められて、2003年以降の低温下の問題を一緒に考えることになりました。PCMDIと言えば、気候モデル相互比較プロジェクト（CMIP）のデータを収集し配布する機関です。さらに、モデルと観測の対比を通して現時点の気候モデルを評価する研究者を擁しています。気候モデルなんてそんなにパフォーマンスが良いもんじゃないよな、と漠然としたイメージでとらえていましたが、彼らは、鮮やかに、気候モデルを積分するとき外力に火山噴火の効果を含めることによって、観測とよく対応する海洋の温暖化が再現されること、この対応は観測のサンプリングを考慮すると更に改善されることを示しました。このころは、東京大学、国



第4図 全球平均海洋貯熱量の時系列。点線は最初に作った客観解析（V4；Ishii *et al.* 2003）、細い実線はIPCCに引用されたバージョン（V6.2；Ishii *et al.* 2006）でまだ、XBT深度補正スキームは導入されていない。太実線は使用する観測データを更新して最新の解析結果（V6.10）を作成したもの。陰影は、 $\pm 2\sigma$ のレンジを示し、細い点線で $\pm\sigma$ を示す。対応するNODCの最新の解析結果を太破線で示す。

立環境研究所、海洋研究開発機構が開発していた温暖化予測モデル（MIROC）による地球温暖化予測プロジェクト（文科省「人・自然・地球共生プロジェクト」平成13年度～17年度）に参加させてもらっていたこともあって、気候モデルの性能が高くなっていることを実感する機会を得ました。そのころは、100年海洋データ同化で海洋モデルを駆動する大気データの与えかたで行きづまっていたときで、上記の経験はこの方針を変更する契機になりました。

彼らとの作業はAchutaRao *et al.* (2007) の論文に纏められました。寒冷化の問題はかぎりなく疑わしいという結論でした。その後、Argoプロジェクトから、一部のArgoフロートの圧力センサの問題から不正な深度が与えられているとの報告がありました（小林ほか 2009）。確かに問題のフロートを使用しないと2003年以降の寒冷化は緩和されるのですが、寒冷傾向は残っています。PCMDIの面々と作業をしながら、XBTも怪しいという感触を得ていました。そこで、当初は傍観していたGouretski and Koltermann (2007) の指摘するXBTのバイアスの問題をきちんと評価する作業に取りかかることにしました。

8. XBT 観測のバイアス

XBTの観測では、航行中の船上から水温センサを

付けた鉛玉（プローブ）を水中落下させ、絶縁コーティングされたワイヤーを通して船上の記録機に値が送られ保存されます。このとき、水温データの水深は、プローブが着水してからの経過時間の2次関数で与えられます。この関数の係数はプローブのタイプ毎に、XBTの製造メーカーから提供されています。1990年代の中頃、世界的に良く使用されるプローブの係数に問題があるとして、修正が加えられました（Hanawa *et al.* 1995）。Gouretski and Koltermann (2007)の指摘は、その修正を加えても歴史的なXBT観測データには高温バイアスが含まれている、というものです。

このバイアスの成因については未解明ではあるものの、現在までにいくつかの補正方法が提案されています。我々は、バイアスはすべて、実測していない深度の推定誤差にあるとしました（Ishii and Kimoto 2009）が、一緒に水温センサのバイアスを考慮するものもあります。さらに我々は、プローブのタイプ別に、XBTメーカー別に深度補正を与える方法を採用しました。その補正を取り入れた客観解析結果は、第4図のバージョン6.10（論文執筆時点のバージョン番号は6.7）のものになります。古いバージョンには1970年代の正のOHC偏差と1980年代の負偏差が顕著に見られますが、新しい解析では消えています。さらに、問題の2003年以降の寒冷化にもXBTバイアスが影響していたことが分かりました。「正の水温バイアスが、なぜ寒冷化に寄与するのか」については、実は、1990年代の中頃からXBTの観測機会が徐々に減少してきて、これにより見かけの寒冷化が生じたためです。

9. ジョンのリベンジ

寒冷化は自然のシグナルだ（Lyman *et al.* 2006）としたジョン・ライマンさんらのグループは、自説を撤回しました（Willis *et al.* 2007）。2010年、XBTのバイアスに関する国際WSで彼に会ったときには、ラジオ番組でそのことが取り上げられ、さんざん敵かれた経験を自虐的に語っていました。

そのジョンですが、XBTの問題についての広報を買って出してくれました。各機関で行われているXBT補正方法を取りまとめ、相互比較し、1990年代以降の水温解析に含まれる誤差の成因について明らかにしました。結論は、海洋の貯熱量の推定における一番大きな誤差要因はXBTの補正方法の違いである、一方、

補正量の程度の差はあれ、ここ十数年間は着実に海水温は上昇している、というものです。以上のことを、データを持ち寄った皆の共著としてとりまとめた論文は、Natureに掲載されました（Lyman *et al.* 2010）。

XBTバイアスの問題は、未解決の問題です。XBT観測データベースの不備、具体的には、プローブのタイプに関するメタ情報が一部出鱈目であるということ指摘する声もあります。日本が行ったXBT観測データについては、きちんとした情報を発信すべきであろうと考え、現在、データベースを再構築する計画が立てられています。また、このデータの再構築は、今後、国際的な枠組のなかで実施されようとしています。

10. 地球温暖化

以上のように作成した客観解析データは、地球温暖化研究に様々に使用されるようになりました。

2007年から始まった文部科学省の、21世紀気候変動予測革新プログラムの近未来予測プロジェクトでも、気候モデルを初期値化するために、表層水温・塩分客観解析データを使用しています。このプロジェクトでは、世界に先駆けて、太平洋十年規模変動の予測が可能であること実証する研究ができたこと（Mochizuki *et al.* 2010）、XBTの補正が十年規模変動の予測には重要であること（Yasunaka *et al.* 2011）を示すことができました。

以上長々と述べてきましたが、歴史的な観測データの品質の理解が進んだことと気候モデルの実用性が高くなってきていることから、今後は、これらの組合せで100年データ同化の実現に向けた作業をしていきたいと考えています。一方で、第4図に示したように、依然として、NODCの最新の解析との差異は大きくなっています。観測データの取り扱いの難しさを実感しつつも、一つずつ、問題解決に取り組んでいきたいと考えております。

11. 御世話になりました

あらためて御世話になったかたがたの御名前を以下に挙げさせていただきます。

遠藤昌宏様、住 明正様、安田一郎様、升本順夫様、この一連の作業を研究としての形を作る際には、研究者として未熟な私は様々なご教示を頂きました。花輪公雄様、IPCC第四次報告書で引用された客観解

析データについて論文をとりまとめることを強く勧めただき、御指導のもと、無事作成することができました。松野太郎様、時岡達志様、地球温暖化予測研究プログラムの皆様、スタッフの皆様、多くの作業は海洋研究開発機構に出向している際に、快適な研究環境の下で行うことができました。歴代気候情報課長、歴代エルニーニョ監視予測センター所長、気象庁では本来業務を疎かにすることもありましたが、皆様のご理解の下で作業ができたと思っております。最後に、木本昌秀様、公私にわたり長年何かとお世話になっていますが、引き続き、よろしく申し上げます。

12. そして神戸

このような作業をする原点が、気象庁での私の最初の勤務地である神戸にあったような気がします。以下、神戸をキーワードにした一つの物語です。

神戸に縁のある我が師、金久博忠先生（気象大学校）に、「今は気象の現場でも竹槍で戦う時代ではない」として、物理、数学、気象学の指導を受けました。1987年のことでした。

その後、海洋気象台として大正時代からの歴史を持つ神戸に3年間勤務しました。この歴史が示すように、台内には既述の神戸コレクションを所蔵し、Natureは創刊号から揃っていました。最初に担当した海洋課潮汐係では台風による高潮の過去の記録がありましたので、整理して高潮の再現期間などを計算しておりました（佐藤ほか1991）。丁度その頃、英国ハドレーセンターのデビッド・パーカーさんから海上気象課の方に神戸コレクションについての問い合わせが来て、小村久美男海上気象課長（当時）が奔走されていた（Komura and Uwai 1992）ことを記憶しています。

当時の神戸海洋気象台では、気象官署としては珍しく気象、海洋の主要な雑誌を購入していましたので、学術的な文献には不自由していませんでした。そんな中、Jones *et al.* (1986)などを目にする機会があって、全球平均値の時系列一本を描くのにこれだけの作業をして求めているのかと感慨にふけったのを記憶しています。

堀内賞は堀内剛二さんという方の功績に由来するものですが、恥かしながらどのような方か知りませんでした。受賞の機会に調べておこうと思い、廣田 勇先生の「天気」の記事（1989年5月号）に当たりました。まだ成層圏についての関心が低い時代に、超高層

を対象とした研究を精力的に進められた方と知りました。さらには、教職を経たのち神戸海洋気象台を皮切りに気象庁の要職を歴任された大先輩であることも知りました。

偶然の巡り合わせでまとめた節の締めになります。堀内さん追悼記事が掲載されていた同号の「天気」には、金久師匠との卒業研究を纏めた論文（石井・金久1989）が掲載されておりました。

参考文献

- AchutaRao, K. M., M. Ishii, B. D. Santer, P. J. Gleckler, K. E. Taylor, T. P. Barnett, D. W. Pierce, R. J. Stouffer and T. M. L. Wigley, 2007: Simulated and observed variability in ocean temperature and heat content. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **104**, 10768-10773.
- 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. 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.
- 石井正好, 2010: 2008年度春季大会シンポジウム「海洋観測が切り拓く気候システム科学」の報告, 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. *天気*, **57**, 768-773.
- 石井正好, 金久博忠, 1989: 気候一次元“模型”の解析. *天気*, **36**, 291-302.
- 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., N. Hasegawa, S. Sugimoto, I. Ishikawa, I. Yoshikawa and M. Kimoto, 1998: An El Nino prediction experiment with a JMA ocean-atmosphere coupled model, “Kookai”. WMO International Workshop on Dynamical Extended Range Forecasting, Toulouse, France, 17-21 November 1997, WMO/TD No. 881, 105-108.
- 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 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.
- Jones, P. D., T. M. L. Wigley and P. B. Wright, 1986: Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature*, **322**, 430-434.
- Kimoto, M., I. Yoshikawa and M. Ishii, 1997: An ocean data assimilation system for climate monitoring. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 471-487.
- 小林大洋, 中村知朗, 湊 信也, 四電信行, 2009: アルゴデータの圧力バイアス問題とその影響. *海の研究*, **18**, 351-391.
- Komura, K. and T. Uwai, 1992: The collection of historical ships' data in Kobe Marine Observatory. *Bull. Kobe Mar. Obs.*, (211), 19-30.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer and C. Stephens, 2000: Warming of the world ocean. *Science*, **287**, 2225-2229.
- Lombard, A., A. Cazenave, P.-Y. Le Traon and M. Ishii, 2005: Contribution of thermal expansion to present-day sea-level change revisited. *Glob. Planet. Change*, **47**, 1-16.
- Lyman, J. M., J. K. Willis and G. C. Johnson, 2006: Recent cooling of the upper ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18604, doi:10.1029/2006GL027033.
- Lyman, J. M., S. A. Good, V. V. Gouretski, M. Ishii, G. C. Johnson, M. D. Palmer, D. M. Smith and J. K. Willis, 2010: Robust warming of the global upper ocean. *Nature*, **465**, 334-337.
- 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.
- Mochizuki, T., M. Ishii, M. Kimoto, Y. Chikamoto, M. Watanabe, T. Nozawa, T. T. Sakamoto, H. Shiogama, T. Awaji, N. Sugiura, T. Toyoda, S. Yasunaka, H. Tatebe and M. Mori, 2010: Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **107**, 1833-1837.
- 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.
- 佐藤啓一, 宮崎健一郎, 石井正好, 1991: 神戸海洋気象台管轄区域における高潮記録について(2). *神戸海洋気象台彙報*, (210), 1-26.
- Willis, J. K., J. M. Lyman, G. C. Johnson and J. Gilson, 2007: Correction to "Recent cooling of the upper ocean". *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L16601, doi:10.1029/2007GL030323.
- Worley, S. J., S. D. Woodruff, R. W. Reynolds, S. J. Lubker and N. Lott, 2005: ICOADS release 2.1 data and products. *Int. J. Climatol.*, **25**, 823-842.
- 山元龍三郎, 1999: 歴史的海上気象資料と海洋・気候研究. *月刊海洋*, **31**, 396-400.
- Yasunaka, S., M. Ishii, M. Kimoto, T. Mochizuki and H. Shiogama, 2011: Influence of XBT temperature bias on decadal climate prediction with a coupled climate model. *J. Climate*, **24**, 5303-5308.
- Yoshikawa, I., M. Kimoto and M. Ishii, 1995: Ocean data assimilation system for climate monitoring at JMA. Second International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, 13-17 March 1995, Tokyo, Japan, WMO/TD No. 651, 561-564.

Climate Monitoring and Prediction with Historical Oceanographic Data

Masayoshi ISHII*

* *Meteorological Research Institute, Tsukuba 305-0052, Japan.*

(Received 21 November 2011 ; Accepted 23 April 2012)
