

XBT の測定精度に関する最近の話題

木津昭一（東北大院理）

1. はじめに

XBT（投下式水温水深計）は、航行中の船舶等において簡易に海洋上層の水温鉛直分布を計測することを目的に開発された測器である。1960年代初めに米国で生まれ、その利便性故に、1970年代から1990年代にかけて世界的に重用された。2000年代以降は観測手段の多様化、とりわけアルゴフロート観測網の整備に伴い、徐々に使用数が減ってきているが、今でも毎年およそ2万本の水温プロファイルデータがXBTによるものとして報告されており、過去半世紀に取得された上層水温データの約3割はXBTによるものとされている。近年では、主にSOOPの高密度XBT測線（HDXまたはHRXと略称される）における主要観測手段としての利用が目立っている。

このように歴史的な水温観測資料の中でも大きな比重を占めるXBTのデータは、近年益々重要視されている海洋の長期変動を定量評価する基礎資料としても広く利用されている。しかしながら、元々XBTはいわゆる「気候研究品質」の測器として開発された訳ではなく、実際、それによる観測データには無視できないバイアスが含まれることが改めて認識されている。

本連絡会において筆者は、現在もなお研究や議論が続く「XBTの深度・水温バイアス問題」について、最近の国際的な情勢をお伝えすることを目的に、発表の機会をいただいた。本稿では、その要点をまとめる。

2. 「XBTバイアス」問題

XBTは、水温水深計と言いつつ圧力センサを持たない。このため、船舶等から投下されたこの測器（プローブと呼ばれる）が水面に突入した瞬間からの経過時間を深度に換算し、一定の

時間間隔で計測される水温値を各推定深度における水温として記録する方法が採られる。このとき用いられる時間-深度変換式を、Fall-Rate Equation（FRE）とか降下速度式などと呼ぶ。FREは、一般に切片が0で2つの経験的定数 a, b （ともに正）を含む、時間に関して二次の関数形：

$$z(t) = at - bt^2$$

をとり、この式により着水 t 秒後の深度 z [m]が求まる。 a と b （以下、FRE係数とも）は各々[m/s]と[m/s²]の単位を持ち（本稿では省略）、より正確な測器との比較等に基づきプローブの種類（表1）毎に予め与えられている。

本稿の時点におけるXBTの公式のメーカーは、本測器の開発者の流れを汲む米国のLockheed Martin Sippican社（以下、Sippicanと略）と、日本の（株）鶴見精機（以下、TSKと略）である。この2社が、企業間のライセンス契約と販売協定にしたがって、各々、表1に示す種類のプローブを製造・販売している。

表1. 日米の2社が販売しているXBTの種類、および対応最大船速(kt)と公称深度レンジ(m)。

Sippican			TSK		
種類	船速	深度	種類	船速	深度
T4	30	460			
T5	6	1830	T5	6	1830
FD	20	1000			
T6	15	460	T6	15	460
T7	15	760	T7	15	760
DB	20	760	T7 20kt	20	760
T10	10	200	T10	10	300
T11	6	460			

いくつかの種類のプローブは2社から同じ名前を出しているが、日米の製品は完全に同じではない (Kizu et al. 2005, Kizu et al., 2011)。また、両社の XBT は国や用途別に売り分けられていて、日本国内で通常入手できるのは TSK 製の XBT のみであるのに対し、欧米や豪州など多くの国では Sippican 製が使われている。

表1のプローブ種のうち、過去に最も多く使われてきたのは460m用のT4、T6と760m用のT7、Deep Blueである。これらのプローブ種(以下、必要に応じ「T6/T7型」と総称する)については、水中での降下速度がほぼ同じであるとの認識の下に、これまではずっと共通のFRE係数が使われてきた。

このT6/T7型用のFRE係数については、過去に多くの議論があった。当初メーカーが発表した係数($a = 6.472$ 、 $b = 0.00216$)は深度を系統的に過小評価すると早くから指摘されていて(例えば Fliehl and Robinson 1977, Singer 1990 など)、その後CTDなどとの比較実験が色々な海域で実施され、それらの結果をもとに新しい係数($a = 6.691$ 、 $b = 0.00225$)が提唱された(Hanawa et al. 1995)。H95の係数(以下、H95と略)がその後、コミュニティ内で認知され、現在では事実上、公式のFRE係数として用いられている。

しかしながら、それから十年以上後、歴史的な水温プロファイルデータの測器別解析から、XBTの水温プロファイルデータに正の系統誤差(warm bias)が含まれていることが指摘された(Gouretski and Koltermann 2007; 以下GK07)。この結果は大きな衝撃をもって受け止められ、その後、多くの研究者によって様々な方法による検証が進められた。当初、この水温バイアスは専らH95のFRE係数にバイアスがあるためと認識されていたが、その後、深度バイアス由来ではない純粋な水温バイアス(pure temperature biasとも呼ばれる)も別に存在するという指摘がなされ(例えば Gouretski and Reseghetti 2010)、今では深度と水温の双方に

バイアスがあるという認識が一般的である。さらに、どちらのバイアスも年代によって変化していると言われており(例えば Cowley et al. 2013)、また、長く同じと考えられてきた日米の同名プローブ種の間にも、近年は系統差があることが分かっている(Kizu et al. 2011)。

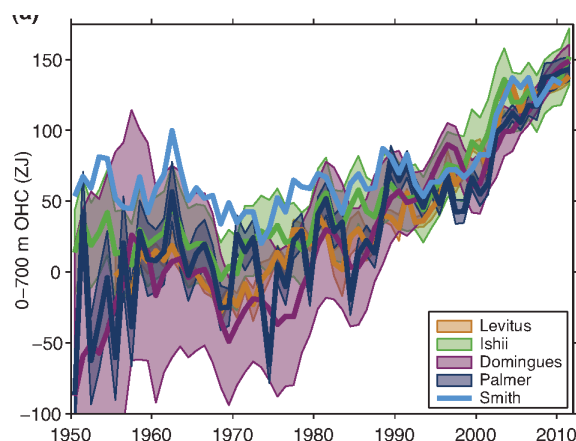
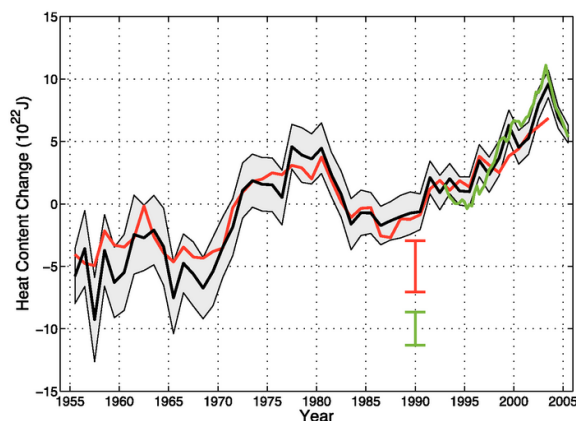


図1. IPCCの最終成果報告書における全球上層海洋(0-700m)貯熱量の経年変化。上段が第4次報告書(Bindoff et al. 2007)、下段が第5次報告書(Rhein et al. 2013)。

この「XBTバイアス問題」のインパクトの大きさを最も端的に表しているのが、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)の第4次、第5次報告書における、全球の上層海洋貯熱量(GOHC)の変化の評価に見られる差異である(図1)。GK07以降の研究結果がまだ認知されていなかった頃の共通認識に基づく第4次最終報告書では、GOHCは顕著な上昇トレンドを示しつつ十年~二十年程度

で大きく変動もしているとされていたが（図 1 上段）、最近の研究による「バイアス補正」（必ずしも XBT に限らない）が施された後の資料を採用した第 5 次報告書（本稿の時点では Final Draft）では様相が全く異なる（図 1 下段）。特に、前者では明瞭に存在した 1970 年代の GOHC の山が、後者ではほとんど無くなっている。さらに後者は、最近でも依然として GOHC の見積りに大きなバラツキがあることを示している。これは、XBT 他測器バイアスに関する評価や「補正」の方法が研究者によって異なるため、現在もまだ収束していない。

ちなみに、2 つの最終報告書の GHOC の差を $10^{23}J$ と見積り、これを全球海洋の上層 700m に均等に配分すると、この層の各深度の水温値に約 $0.1^{\circ}C$ の正のバイアスがある計算になる。これに対して、XBT の公称精度は水温について $\pm 0.2^{\circ}C$ 、深度については 5m 又は 2%（両者のうちの大きい方）とされている。バイアスと精度の違いはあれど、GOHC の正確な見積りのために求められる水温の誤差水準が、XBT の測器としての信頼性に比して大変高いことが分かる。

GK07 に端を発したこの XBT バイアス問題については、これまでに少なくとも 4 回の国際会議（XBT Fall Rate Workshop @マイアミ 2008 年 3 月、XBT Bias and Fall-Rate Workshop @ハンブルク 2010 年 8 月、The First XBT Science Workshop @メルボルン 2011 年 7 月、CLIVAR-GSOP Coordinated Quality-Control of Global Subsurface Ocean Climate Observations @ホバート 2013 年 6 月）が開かれ、そのたび議論が重ねられてきた。会議名の変遷にも現れているように、回を追って問題認識の変化や共通化が起こるとともに、コミュニティの関心は次第に XBT 以外の測器を含めた歴史的な水温プロファイルデータ全般の品質向上に広がってきている。

XBT バイアス問題の解決の難しさは、大きく二つの要素に由来する。一つは測器自体の特性やその変化がまだ十分に解明されていないこと

で、もう一つは大規模データベースにおけるメタ情報の不備である。

前述の通り、今では多くの研究者によって年ごとやプローブ種ごとの「バイアス補正」の方法が提案されている。しかし、その多くは大規模データベース（例えば World Ocean Database 等）に含まれる歴史的な水温資料の統計解析から導かれたもので、バイアスの原因を明らかにした上で測器問題としての解決を果たした訳ではない。実際、論文によってもまだ相当なバラツキがあることを前述した。かつての H95 のような XBT 対 CTD 等の直接比較観測も依然行われているが（最近の例では Kizu et al. 2011）、それ自体が変動する海において十分な質・量の比較データを集めることは容易でなく、また特に古い時代のプローブについてはそのような比較実績自体がほとんどないこともあって、これらの直接比較のみによって過去の時系列に補正を施すことはできていない。

一方、大規模なデータベースにおける XBT 観測データのメタ情報には致命的な不備がある。通常、XBT による水温プロファイルデータには、観測の日時や場所等の一般的な観測情報に加え、用いた XBT のプローブ種やメーカー、深度計算で使われた FRE 係数などの固有のメタ情報が付随する。しかしながら、これらについては誤登録が少なくないことが知られ、またそもそもプローブ種や FRE 係数が記録されるようになったのが 1990 年代半ば以降のため、それより前のデータについては基本的に情報が乏しい。さらに、仮に製造年代によって XBT の特性が異なる場合、これをプロファイル毎に補正しようとする個々の観測で使用されたプローブのシリアル番号（プローブのラベルに印刷してある）が必要だが、現在の大規模データベースにおいてこれを備えるものは無い。また、ある種のバイアスはプローブでなく記録系に由来すると言われているが、それらのメタ情報も不足していて補正は容易でない。これらのメタ情報の不完全さが、現状における「バイアス補正」の

バラツキの一因でもある。したがって、XBT バイアスの実態を今以上の確度で解明し、これに対して適正な補正をかけるためには、XBT プローブや観測システムの特徴の履歴の解明と、大規模データベースに含まれるメタ情報の品質の向上とを同時に進める必要があるのである。

3. 近年の研究から

ここでは、すでに公表されている近年の研究成果の中からいくつかをご紹介して、現状の理解の助けとさせていただきたい。

まず、現時点で最も新しい「バイアス補正」のスキームである Cowley et al (2013)から、Sippican 製の T6/T7 型 XBT の降下速度に見込まれるバイアスと純粋な水温バイアスの経年変化の見積を、それぞれ図 2 と図 3 に示す。

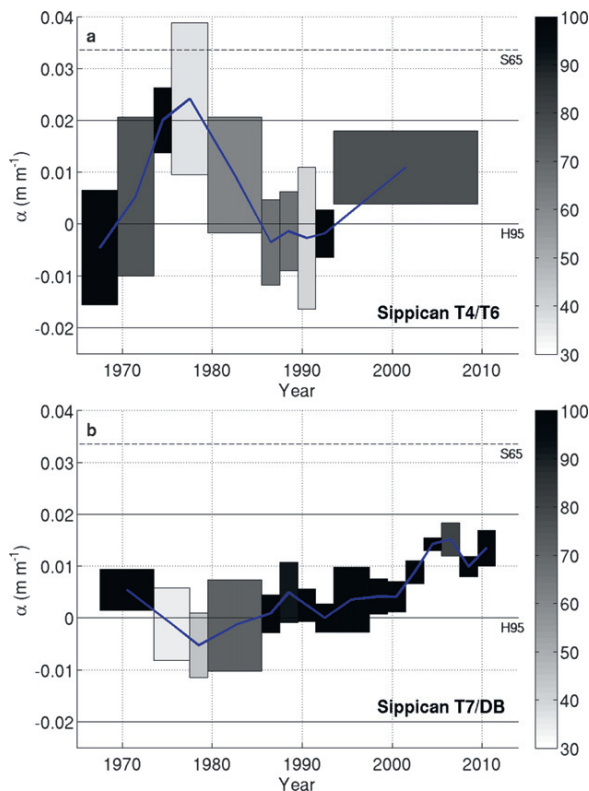


図 2. Sippican 製 XBT の降下速度に見込まれるバイアスの経年変化の見積 (H95 基準)。上段が T4/T6、下段が T7/DB。Cowley et al. 2013 より。

この研究の特徴は、それまでの統計解析の主流であった緯度経度格子毎といった大雑把な比較ではなく、埋もれていたクルーズレポート等の発掘などを経てプロファイル毎の XBT と CTD やボトル採水との同時性の高い直接比較を実現し、より信頼性の高い測器間較正を試みた点にある。この結果によれば、これらの種類の XBT の降下速度のバイアスはすべての年代を通してほぼ±2%のメーカー公称精度の範囲内にあり、それまでの多くの論文の結果に比べて補正の程度はかなり抑制的である。加えて、これまでずっと同じとされてきた T4/T6(460m 用)と T7/DeepBlue (760m 用)の降下速度が、このレベルでは年代によってかなり異なることを示した。さらに、それ以前の研究の主張と同様に、深度バイアスは全般に正で、水温に warm bias を生むセンスであったことが分かる。

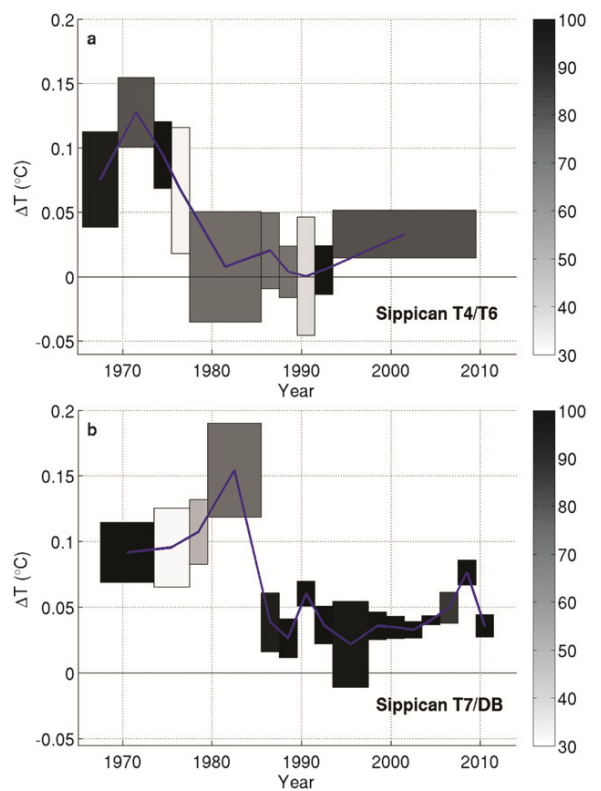


図 3. Sippican 製 XBT の水温プロファイルに含まれる純粋な (深度誤差由来でない) 水温バイアスの経年変化の見積。上段が T4/T6 で下段が T7/DB。Cowley et al. 2013 より。

一方、図3に引用した「純粋な水温バイアス」の傾向は、1980年代を境に前後で様子が大きく異なっていて、アナログ式のレコーダ（いわゆるペンレコ）が使用されていた古い年代のXBTデータに、より顕著な正の水温バイアスが乗っていることを示している。この「純粋な水温バイアス」の原因は未だ説明されていない。

次に、図4は、近年の製品に見られる日米のT7型XBTの降下速度の違いを示している（Kizu et al. 2011）。日米のメーカーは、前述のような企業間のライセンス契約と共通の基本仕様に基づき、それぞれがほぼ独立にXBTを生産している。サーミスタ以外の部品は個別に調達されていて、プローブの重量や構造には種々の差異がある。実際、それらを反映して、近年のT7同士で比較すると降下速度には3-4%の系統差がある。このような差はH65では検出されておらず、両社の製品の違いもまた経年的に変化していることになる。筆者らの実験により、XBTの降下速度の違いや変化には重量とプローブ構造の両方が影響しているらしいことが分かっている（Kizu and Hanawa 2014）。

さらに近年の研究は、船の大型化などに伴う投下点の高さの変化がXBTの深度バイアスに寄与している可能性を示唆している。NOAA/AOMLが行った水槽実験の結果によれば、投下点が低い（海面に近い）時は着水後すぐに降下速度の増加（加速）が、投下点が高い（海面から遠い）時は逆に減速が起これ、この初期のバイアスが深度誤差に乗る（Bringas et al. 2013）。実験の性格上、船の航走や波の影響などは考慮されていないものの、このような投下点の高度差の影響は少なくとも数mの深度バイアスを生むと考えられており、高精度の水温プロファイルの推定にとっては無視できない可能性がある。

Kizu et al.(2005)は、T5型XBTの降下速度が水温に依存し、高い水温の時に降下速度がより大きくなることを示した。海水の粘性は水温に依存し、分子粘性係数で比べると0°Cと25°C

とでは約2倍違う。降下速度の水温依存性は恐らくこのような海水の粘性の水温依存性を反映していて、同様の傾向はT7型のXBTについても検出されている（Kizu and Hanawa 2014）。

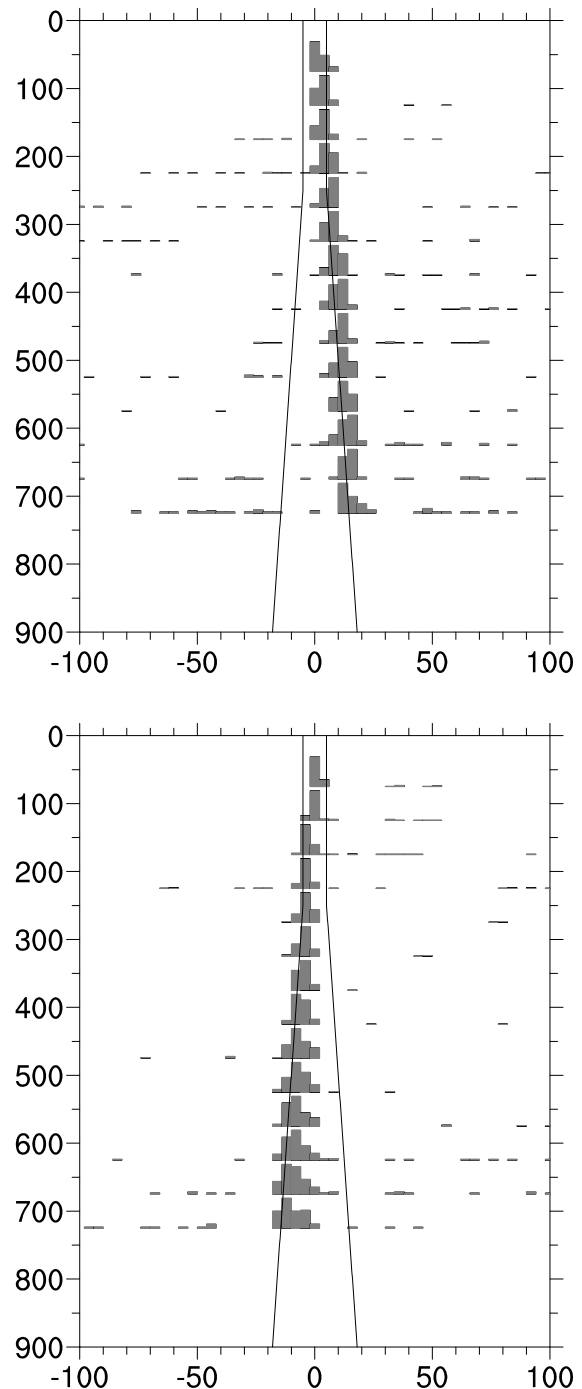


図4. 近年のT7型XBTの降下速度に見られる日米製品の違い。縦軸が深度で横軸が深度誤差(単位はともにm)。上段がSippican製、下段がTSK製。Kizu et al. 2011より。

また、Cowley et al.(2013)が Sippican 製 XBT について示したような降下速度の経年変化は、TSK 製 XBT についても存在したことが分かっている (Kizu 2014)。ただし、その変化傾向は Sippican 製のそれとは異なっていて、個々のメーカーについて履歴を明らかにすることの重要性を示している。

最後に、NOAA と Sippican が目下共同で進めている「圧力スイッチ付 XBT」の開発について紹介する。前述の通り、元々 XBT には水圧を検知する仕組みがなく、これが深度バイアスを巡る長年の混乱の原因でもあった。Goes et al.(2013)は、プローブが水中を降下している間の幾つかの深度で水温プロファイルに目印を入れられるような小型の圧力センサをプローブに仕込むことによって、深度の誤差を劇的に軽減できることを実証した。このアイデアの優れている点は現状の XBT プローブの構造に大きな変更を加えることなく深度補正を実現できるところにある。今後の課題は、検証のための更なるデータの蓄積と商品化である。

4. おわりに

本発表では、近年、より重要視されるようになった、いわゆる「XBT バイアス問題」について、コミュニティにおける認識の現状と取り組みの一端を紹介した。これから取得されていく XBT データの信頼性の向上のためにできることは少なくなく、中でも観測に関するメタ情報（例えば、プローブのシリアル番号や記録システムの種別など）の保存・共有と、継続的な測器特性のモニタリングが最も重要である。一方で、すでに取得されたデータに関して今からできることは限られているが、それでも、海洋温暖化のような海の長期変動の解明のためには歴史的データの信頼性向上が欠かせないので、今後の更なる検証の蓄積とメタデータの発掘整備が期待される。

歴史的な水温プロファイルのデータベースの再

構築を目指して、国際的なコミュニティでは最近、IQuOD (International Quality-Controlled Ocean Database) と呼ばれる試みが始まった。これは、水温プロファイルの観測のためにこれまで使われてきた種々の測器のそれぞれについて、バイアスの有無やその実態を解明し、それとともに品質管理のスキームを見直して、より信頼性の高い水温観測資料の構築を目指すものである。XBT バイアス問題への対応は、その中でも大きな位置を占めている。日本国内でも、同様の問題意識から、XBT-Japan なる有志のプロジェクトが進行しつつある。データベースの品質向上は、地味な仕事ながら、科学的研究の基礎となる重要なインフラを提供する。その実現のためには、観測者（データの発信者）とデータベース運用者の継続的な努力が不可欠で、皆様にもぜひご協力をお願い致したい。

参考文献

Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, 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.

Bringas, F., G. Rawson, P. Pena, Z. Barton and G. Goni, 2013, The first meters of the XBT fall, *Seventh Session of the JCOMM Ship Observations Team (SOT)*, Victoria, 22-26 April, 2013.

Cowley, R., S. Wijffels, L. Cheng, T. Boyer and

- S. Kizu, 2013, Biases in expendable bathythermograph data: A new view based on historical side-by-side comparisons, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **30**(6), 1195-2125.
- Fliehl, G. R. and A.R. Robinson, 1977; XBT measurements of thermal gradients in the MODE eddy, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 300-302.
- Goes, M., G. Goni and K. Keller, 2013, Reducing biases in XBT measurements by including discrete information from pressure switches, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **30**, 810-824.
- 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., and F. Reseghetti, 2010, On depth and temperature biases in bathythermograph data: Development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database, *Deep-Sea Res. I*, doi:10.1016/j.dsr.2010.03.011.
- 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 (XBT), *Deep-Sea Res. I*, **42**, 1423-1451.
- Kizu, S., 2014, Year-to-year change in the fall-rate of T6/T7 expendable bathythermograph. (投稿準備中)
- Kizu, S. and K. Hanawa, 2014, Effects of probe weight and water temperature on the fall-rate of expendable bathythermograph. (投稿準備中)
- Kizu, S., S. Itoh and T. Watanabe, 2005, Inter-manufacturer difference and temperature dependency of the fall-rate of T-5 expendable bathythermograph, *J. Oceanogr.*, **61**(5), 905-912.
- Kizu, S., C. Sukigara and K. Hanawa, 2011, Comparison of the fall rate and structure of recent T-7 XBT manufactured by Sippican and TSK. *Ocean Sci.*, **7**, 231-244.
- Rhein, M., S.R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R.A. Feely, S. Gulev, G.C. Johnson, S.A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L.D. Talley and F. Wang, 2013: Observations: Ocean. In: 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.
- Singer, 1990, On the error observed in electronically digitized T-7 XBT data, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **7**, 603-611.