

## 情 報

### 目 次

1. 集会等の報告	334
1.1. The XBT Bias and Fall-rate Workshop 参加報告 . . . . .	334

\*\*\*\*\*

### 1. 集会等の報告

#### 1.1. The XBT Bias and Fall-rate Workshop 参加報告

会 期 2010年8月25日(水)~27日(金)

場 所 ドイツ ハンブルク市

参加者 米国, ドイツ, 豪州, イタリア, フランス, ブラジル, 南アフリカ, インド, 中国, 日本から延べ 28 名。

International CLIVAR (Climate Variability and Predictability) Project Office による旅費支援を受け, 標記の会議に参加したので, その概要を報告する。

本会議は, CLIVAR Fourth Global Synthesis and Observations Panel Meeting (2009年11月11~13日; 東京) の勧告にしたがって組織された。会場は, ドイツ北部のハンブルク市内にあるハンブルク大学 KlimaCampus の the Centre for Marine and Atmospheric Sciences (ZMAW) の真新しいビルの一室であった。日本からは, 東北大学の花輪雄雄教授, 気象研究所 / (独) 海洋研究開発機構の石井正好博士, および, 筆者の3人が参加した。その他の国別の出席者数は, 米国が11人, ドイツが4人, 豪州が2人, 他の各国からは1人ずつであった。

本会議の目的は, その名の通り, XBT (eXpendable Bathy Thermograph; 投下式水温水深計) の降下速度と計測水温に見込まれるバイアスを定量的に評価し, それに対する補正の方法やその妥当性について議論することにあつた。背景には, 近年, 全球的な表層貯熱量の解析を通して多くの論文が指摘している, XBT 観測による水温プロファイルの warm bias の問題がある。XBT は 1970 年代から 1990 年代にか

けて大量に用いられ, 現在でも表層水温観測の約 1 割 (年間約 2 万 5 千点) を占めると言われる。もしその深度や水温にバイアスが存在すると, 海洋の長期変動や温暖化の評価にも大きな影響が出るため, 最近, 多くの論文が発表されている。今回と同じ趣旨のワークショップが 2008 年 3 月に米国マイアミの NOAA/AOML (Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory) で開かれており (日本からは参加者なし), 今回は事実上, それに続く 2 回目の会合であった。

初日の会議の冒頭, まず今回のホストとなったハンブルク大学の教授かつ Institute of Marine Research の所長である Detlef Stammer 博士から参加者に向けて歓迎の挨拶があり, KlimaCampus および当地で進行中の諸々のプロジェクトや研究教育活動の紹介があつた。それに続いて, 各自の口頭発表に移った。3 日間を通して, 朝は 8 時半前後から始まり, 初日と 2 日目は夕方 5 時頃まで, 昼食と数度の短い休憩をはさみながら会議が続いた。3 日目の午前中は総合討論に費やされ, その日の昼食をもって解散した。3 日間の口頭発表総数は 23 件であった。各自の発表時間が長めで (予定では一応, 40 分であったが, かなりフレキシブルに伸縮した), 各々の話をゆっくり聴けた点は大変良かった。

おそらく読者の多くがご存じであろうが, XBT は船などから水中に投入されるブローブ型の測器で, それが水中を自由落下する間, 一定の時間間隔で水温を計測する。圧力センサを持たず, 水深を直接計測してはいないため, 時々刻々の水温計測の深度は所定の経験式を用いて着水後の経過時間から計算される。このとき用いる式を降下速度式 (Fall-rate equation; 以下, FRE と略す) と呼ぶ。この式がバイアスを持つと深度の縮尺が狂い, 欲しい深度の水温が正や負のバイアスを持つことになる。XBT には, 開発年代が異なる幾種類かのブローブが存在し, 現在は米国の LMS (Lockheed Martin Sippican) と日本の TSK (鶴見精機) の 2 社が世界のシェアを分け合っている。中でもこれまで多く使われてきた T-4, T-6 (ともに公称 460m 深まで測定可能), T-7, Deep Blue (ともに同じく公称 760m まで) といった種類のブローブ (LMS 社はそれらの 4 種すべてを, TSK 社は T-6 と T-7, および高速船用 T-7 の 3 種を販売) については, 1970 年代から, 当初メーカーが提示した FRE が負のパ

イラスを持つ(すなわち降下速度が遅すぎる)という指摘が相次いだため、IGOSS(Integrated Global Ocean Services System)のTT/QCAS(Task Team on Quality Control for Automated System)が組織的な比較観測と解析を行い、現在、Hanawaらの式(Hanawa *et al.*, 1995; *Deep-Sea Res.* 誌; 以下、H95)として知られる新しいFREを提唱した。その後、メーカーのデータ取得システムにもH95の式が採用され、現在まで、これがそれらのプローブ用のFREの事実上の世界標準となっている。

ところが、今回の会議のホスト役でもあるハンブルク大学のViktor Gouretski博士らが2007年に発表した論文(Gouretski and Koltermann, 2007; *Geophys. Res. Lett.* 誌)を皮切りに、H95のFREには正の深度バイアスがあるという指摘が多くの研究者によってなされるようになった。全球的なデータセットに含まれる水温プロファイルを測器別に分けて解析すると、CTDやBottleサンプリングに比べてXBTの計測水温が正のバイアスを持ち、その主な原因がH95の提唱したFREの誤差にあるというのである。その後の研究で、XBTの降下速度が年代によって変化しているらしい(Wijffels *et al.*, 2008; *J. Climate* 誌, 他)とか、FREだけでなく計測水温そのものにも正のバイアスがあるらしい(論文としてはGouretski and Reseghetti, 2010; *Deep-Sea Res.* 誌)等といった指摘が続けざまになされたことが、前述の第一回ワークショップの開催に繋がった。しかし一方で、当時のこの種の解析が例外なくXBTと基準測器(CTDなど)との同時観測に基づくものではなかったこと、および、実際にXBTという測器がどのような特性を持ち、それが年とともにどのように変わった可能性があるのかといった事実の裏付けに乏しかったこと等、問題点も有った。前回会合の参加者のなかに、かつてのTT/QCASのメンバーが一人も含まれていなかったことも、論点の整理のためにはマイナスであったと思う。そこで、その後の研究の進捗を待って、あらためて開かれたのが今回の会議であった。

本会議の結果、前回会合が開かれた2年前よりも、年代によってXBTの降下速度が異なり、その結果、少なくとも過去のある年代のプローブについてはH95のFREがバイアスを持つという先行研究の仮説が、より信憑性を帯びてきたように思う。幾つかの根拠がある。例えば、筆者らが2008年に行った比較観測によって、最近製造された2社のT-7の降下速度は明確に異なり、しかも双方ともH95の式とは合わないことがわかった。また、両社のプローブには重量のほか構造的にも異なる点が多数あり、たとえ同じモデル名であっても区別すべきであること、さらに、両社のT-7の降下速度には共に水温依存性があること等が明らかになった(いずれも本

会議にて発表;*Ocean Science* 誌で審査中)。H95はプローブ自体の詳細な比較をしなかったが、2社のプローブの降下速度に差がないことを間接的に確かめた上で両者に共通の式を提唱したので、少なくともH95から現在までの間には、何らかの原因により少なくとも一方のプローブの降下速度が変化したと考えざるを得ない。また、豪州CSIRO(Australian Commonwealth Scientific and Research Organization)のRebecca Cowley氏らは、これまで電子化されていなかった過去の膨大な観測資料のなかから千五百点余のXBT/CTD比較観測のデータを発掘し、解析した。その結果、1980年代半ば以降、共著者のSusan Wijffels博士が先に示唆(前出論文)したように降下速度が経年変化しているらしいことを改めて示した(ただし、その変動幅は先行報とは相当異なっていた)。それまで、直接比較観測に基づく解析は、ほとんど、特定の製造時期の、せいぜい1~数ダース程度の少数のサンプルを使って行われてきたので、それらには結果が持つ統計的有意性に対する疑念やロット間のバラツキではないかとの見方が常に付きまとっていたが、Cowley氏らの圧倒的なデータ数は、その懸念を遙かに凌駕するものであった。2つのメーカーは共に、水中降下速度に影響するような製品の改造は過去に一度も行っていないとコメントしているが、本会議においても、それとは矛盾する内容の研究発表が目立った。

筆者らの調査によって、2つのメーカーのT-7の降下速度の差は、プローブ重量の差だけでは説明できないことがわかっていく。このことは、XBTの降下速度にとって、プローブの形状や内部構造が大きな影響を与えていることを示唆する(同様の問題はT-5にも存在したが、この場合はもっと複雑で、水中重量で上回るTSK製T-5のほうがLMS製より遅く降下することが明らかとなっている)。しかし、2つのメーカーの製品検査はほとんど重量のみについて行われているので、仮に年代とともに部品の形状や構造に意図しない微妙な変化があったとしても、それを通常の製造工程のなかで適切に検出できた可能性は低い。さらに、本会議におけるGrant Johnson氏(LMS社)の発表は、同社のXBTのある部分が、過去の少なくとも複数年にわたって構造的欠陥を持っていたことを明らかにした。同社の実験によって、この欠陥を排除した2008年8月以降のプローブでは降下速度が増し、かつ安定したそうなので、そのような製造上の問題も過去の降下速度の変動に寄与した可能性があると考えねばならないのかも知れない。かつてのTT/QCASのリーダーであり、H95の筆頭著者でもある花輪教授からは、ワイヤ放出に伴う水中でのプローブの重量変化や、水の抵抗、投下点の高さなどを考慮に入れた降下速度のシンプルなモデルが提案され、多くの参加者の注目を集めていた。このようなモデル

は、我々がブローブの水中降下運動をどのくらい定量的に理解し、数式で表現することができるかの試金石となるだろう。

FREのバイアスとは別の問題として、XBTの計測水温そのもののバイアスについての発表も幾つかあった。降下速度の誤差を補正した上で他の測器とプロファイルを比べたり、あるいは良く発達した混合層のように深度誤差が水温に反映されにくい条件でデータを比較したりすることによって、純粋な水温バイアスを検出する試みが複数の参加者から紹介された。程度にバラツキはあったものの、XBTの観測水温には正のバイアスがあるらしいことが共通して示された。その明確な原因はまだわかっていないが、筆者は、この正の水温バイアスを説明する一つの仮説として、LMS社のXBTのワイヤの絶縁コーティングの性能が特に冷水中で低下しやすいことを示す実験結果を提示し、加えて、観測中に対水絶縁に綻びが生じた場合、回路の特性上、正の水温バイアスを生じやすいことを説明した。

本会合の大部分の参加者の興味は、測器そのものの特性というよりは、XBTにまつわる前述の2種類のバイアスが全球的な貯熱量変動の評価にどの程度の影響を与えるのかを知り、それを如何に補正するかという点にある。この点に絞った発表も多数あった。端的には、例えば緯度経度や時間の関数として深度や水温の補正ファクタを求め、既存のデータセットに適用することを目標としているように見えたが、これはそう簡単ではない。なぜなら、降下速度や水温のバイアスが緯度や経度の関数でなければならぬ直接的理由はほとんどなく（重力が地理的に微小に変化することを除いて）、成層構造が空間分布を持つが故に、降下速度の水温依存性などのために間接的にそう見えるに過ぎないと思えるほうが自然だからである。本会議においても、補正係数は深さの関数にすべきであるとか、年の関数でもあるらしいといった、いくつかの基本的合意は得られたものの、基本的には互いの推定結果を示し合うに止まった。この問題に関しては、近く開催されるAGU（米国地球物理学連合）の2010年秋季大会でもセッションが設けられる予定で、JPL（米ジェット推進研究所）のJosh Willis博士からその宣伝があった。

降下速度がどうやら年々変化しているらしいという見方が広まったことと併せて、種々のデータベースにも、観測で使ったブローブやシステム（例えばコンバータ）の情報を残すべきであるとの認識が改めて共有された。XBTブローブを特定するメタ情報としては、メーカー、タイプ（"T-7"など）、シリアル番号（製造年月を特定するためには不可欠）の3つがあるが、現在普及しているデータ交換の際のフォーマット（BATHYやTESAC等）には、このうち最後のシリアル番号が含まれない。したがって、問題の解決のためには、観

測者（or データの提供者）がそれらのブローブ情報を保存することと、その流通を許す新たな交換フォーマットの普及が必須となる。これに関連して、AOMLのJoaquin Trinanes氏からは、現在、GTS（Global Transmission Services）用の新世代のデータフォーマットとして導入が計画されているBUFR（Binary Universal Format for the Representation of data）のポリシーとその内容が紹介された。

今回の会議の参加者には、大きく分けて2種類の人々が居たように思う。一方は、測器としてのXBTのバイアスを、その特性に沿って理解しようとしている（or そうしてきた）人々で、筆者はこちらに属す。もう一方は、前々段落で述べたように、測器としての特性というよりはデータセットの中のバイアスを見ようとしている人々で、今回は明らかにこちらが多数派であった。両者は共に重要だが、これまでは、なかなか話が噛み合わないところもあった。本会議の一番の収穫は、双方の立場の人が一同に会して情報を共有し議論したこと、そして、その結果、特に後者のなかに前者の考え方が少し浸透したこと、すなわち、これまで統計的な解析に終始してきた研究者のなかに、より合理的に問題点を整理しようとする動きが出てきたことであると思う。

とは言え、難しい問題もある。その最たるものは、恐らく、いくつかの先行研究が「バイアスが最も顕著だ」と指摘している「温かい1970年代」の真偽であろう。Wijffels博士らの前出論文の結論は、XBTのバイアスを（その当時の彼女らの方法で）"補正"すると、1970年代から1980年代初頭にかけて存在したとされている十年規模の温暖化傾向がほぼ消えて無くなり、より着実な海洋温暖化が見えてくるというものであった。Gouretski博士（前出論文）や石井博士らの結果（Ishii and Kimoto, 2009; *J. Oceanogr. 誌*）もこれに近くて、もしそれらが正しければ、この年代の表層水温変動の解釈を我々は大きく改めねばならないことになる。しかし、これらの研究の主張はTT/QCASの仕事に至る、そもそもの経緯とは対立するので、これで問題が着着したとはまだ言えない。この点に関して、花輪教授からは、データセットの中でこの年代のデータに二重にH95の補正が加えられた可能性があるのではないかと指摘がなされたが（そう仮定すると少なくとも定性的には問題の解釈を助ける）、その真偽はまだ明らかでない。さらに、各研究者が指摘する水温や深度の「バイアス」のなかにはメーカーの公称精度（水温： $\pm 0.1 \sim 0.2$ （両社で異なる）、深度： $\pm 2\%$ ないし $\pm 5\text{m}$ ）より小さいものも少なくなく、そもそもXBTに期待しすぎなのではないか？と疑問に感じることも多い。参加者の一人であるLMS社のWolfgang Schlegel氏からは、「皆さんの言い分はわかった。我々としても継続的に精度をモニタする必要

は認識しており、その方向で予定を立てている。また、特別に圧力センサを付けたモデルの製品化も計画している。ただし、その値段は今の製品の2倍くらいになるだろう。それでも皆さんには買ってもらえるだろうか？ メーカーとしては、「ユーザーが一体どのくらいの精度の測器を必要とし、それにどのくらいの需要が見込めるかを見極めなければならない」という趣旨の、メーカーとしては至極当然とも言える発言があった。測器にまつわる問題の解決にとってメーカーの協力は不可欠であり、また、このXBT問題が与えるインパクトは極めて大きいので、お互いの立場を理解した上で今後も交流を続けていくことが重要である。その意味では、今回、双方のメーカーから参加（LMS社から2人、TSK社から1人）があったことは大変有意義であった。会議の席上、LMS社は、同社の保有する実験場で今後も定期的に海上試験を実施し、降下速度の変動のモニタリングを行うことを約束した。

会議初日の晩に、会場からほど近いMirabelleというレストランでディナーパーティが開かれ、参加者の多くが出席した。また、比較的小規模の会合で、昼食を会場内で摂れたことも、参加者間の活発な対話を促した。今回の会議の実現はもとより、会場の準備から諸々の手配まで多くのことを取り仕切って下さったホストのGouretski博士に深謝したい。

第3回以降の会合の時期や場所などについては未定である。次の機会には、今回は参加者がなかったカナダ、英国、北欧諸国、スペイン等の諸国からも出席があることを期待したい。なお、本会議の総括は、各発表の要旨とともに、ハンブルク大学のウェブサイト（URL：<http://www.klimacampus.de/996.html>）で公開されている。

（木津 昭一、東北大）