

T-5型XBTプローブの時間－深度変換式の誤差について

三浦 貴博^{*1} 根田 昌典^{*1*2} 滝川哲太郎^{*1} 市川 洋^{*1*3}

地球観測フロンティア研究システム・気候変動観測研究領域・日本沿海予測実験グループでは、南西諸島南東海域を集中観測海域と設定し、琉球海流系の観測を行っている。当グループでは、航海時間の制約などによって投下式水温水深計(XBT)観測を行わざるを得ない際には、最大観測深度が最も深いT-5型XBTプローブを使用している。しかし、メーカーが提供しているT-5型XBTプローブ用の時間－深度変換式から得られる観測深度には大きな誤差が含まれていることが指摘されている。このため、T-5型XBTと電気伝導度水温水深計(CTD)との同時観測を南西諸島南東海域の12点で行った。今回の観測で得た資料より、メーカー提供の時間－深度変換式が持つ最深部での誤差(約100m)を大きく改善した、最深部での誤差を約10mとする時間－深度変換式を新たに求めた。

キーワード：XBT, T-5, 観測深度誤差, 時間－深度変換式

Depth error in time-depth equations of the T-5 XBT probes

Takahiro MIURA^{*4} Masanori KONDA^{*4*5}
Tetsutaro TAKIKAWA^{*4} Hiroshi ICHIKAWA^{*4*6}

Japan Coastal Ocean Predictability Experiment Group/Frontier Observational Research System for Global Change (JCOPE/FORSGC), has been carrying out the observation of the Ryukyu Current System in the southeast of Nansei Islands. We have many chances to employ the expendable bathythermograph (XBT) observation system due to the various reasons such as saving time or the bad weather. We use T-5 XBT probes because of its capability to observe the maximum depth. However, a caution is raised by several studies to report that the relationship between the released time and the depth of the T-5 probes presented by manufacturer may produce the significant error for the depth of the layer. We try to verify the depth error of the T-5 XBT probes by the simultaneous observation with the conductivity temperature depth recorder (CTD) casts at 12 points of southeast of Nansei Islands and to regional evaluate the time-depth equation. From the data obtained by this observation, we find the serious inconsistency between the manufacturer's equation and the collocated CTD observation. We present a time-depth equation to be adopted from this study. As a result, we succeeded in reducing the depth error, which is about 100m by the manufacturer's equation, to about 10m in the deepest section.

Keywords : XBT, T-5, depth error, time-depth equation

* 1 地球観測フロンティア研究システム

* 2 京都大学大学院理学研究科

* 3 鹿児島大学水産学部

* 4 Frontier Observational Research System for Global Change

* 5 Graduate School of Science, Kyoto University

* 6 Faculty of Fisheries, Kagoshima University

1. はじめに

投下式水深水温計 (expendable bathythermograph; XBT) には最深観測深度により幾つか種類があり、観測目的によって使い分けられる。このうち最も深くまで測定できるのがT-5型とよばれるものであり、最大観測深度は1830mである。比較的多く使用されているT-7型 (最大観測深度760m) やT-6型 (最大観測深度460m) のプローブについては時間-深度変換式の検討が行われ、観測誤差の少ない変換式の提案がなされ (Hanawa et al., 1995¹⁾), 現在、世界で広く採用されている。

地球観測フロンティア研究システム・気候変動観測研究領域・日本沿海予測実験グループでは、南西諸島南東海域を集中観測域として、琉球海流系の観測を行っている。航海時間の制約などによりXBT観測を行わざるを得ない際には、最も深くまで計測が可能であるT-5型XBTプローブを用いている。しかし、T-5型についてはメーカ (Sippican) 提供の時間-深度変換式の誤差が大きいと言われている。Boyd and Linzell (1993²⁾), 以下BL1993)はサルガッソ海におけるT-5型XBTと電気伝導度水温水深計 (conductivity temperature depth recorder; CTD)との同時観測の結果から新しい時間-深度変換式の提案を行ったが、他の海域における妥当性については明らかではない。

そこで、本研究では、南西諸島南東海域においてT-5型XBTとCTDの同時観測を行い、CTD観測による水温との比較からT-5型XBTの観測深度の誤差を見積もり、南西諸島南東海域における観測精度を上げるために、新たに時間-深度変換式を作成した。

2. データと方法

2003年8月17日から23日までの長崎大学水産学部練習船 鶴洋丸航海において行われたCTD観測点の内、最大観測深度が1830mを越える12測点においてCTDとXBTの同時観測を行った (図1)。使用したXBT観測機器は、XBTプローブは鶴見精機製T-5型、コンバータは鶴見精機製MK-130デジタルコンバータ、投入はハンドランチャを用いた。比較に用いたCTDはSea-Bird製SBE-25型メモリ式CTDである。

XBTの観測深度は、XBTが海面に着水してから経過時間を深さに変換した値を用いている。一般的に時間-深度変換式は、観測深度を z (m)、プローブが着水してから経過時間を t (秒)として、

$$z = bt - at^2$$

の形で示される。メーカ提供の時間-深度変換式は、

$$z = 6.828t - 0.00182t^2$$

である。

XBT/CTDの同時観測は、CTD観測開始後、CTDワイヤを100m繰り出した直後にXBTを投入することによって行った。XBTの落下速度は約6m/sで観測時間は約3分間である。

全12点のうち1点 (P033)については表層からXBT水温が異常に高い値を示したため、エラーデータとして解析の対象から外した。また、他の1点 (P153)では1000m付近でXBTの断線が生じたため、取得できた分のみのデータを用いた。これら以外の10点 (AE03~AE08及びOS03~OS06)については1830mまでデータが取得された。

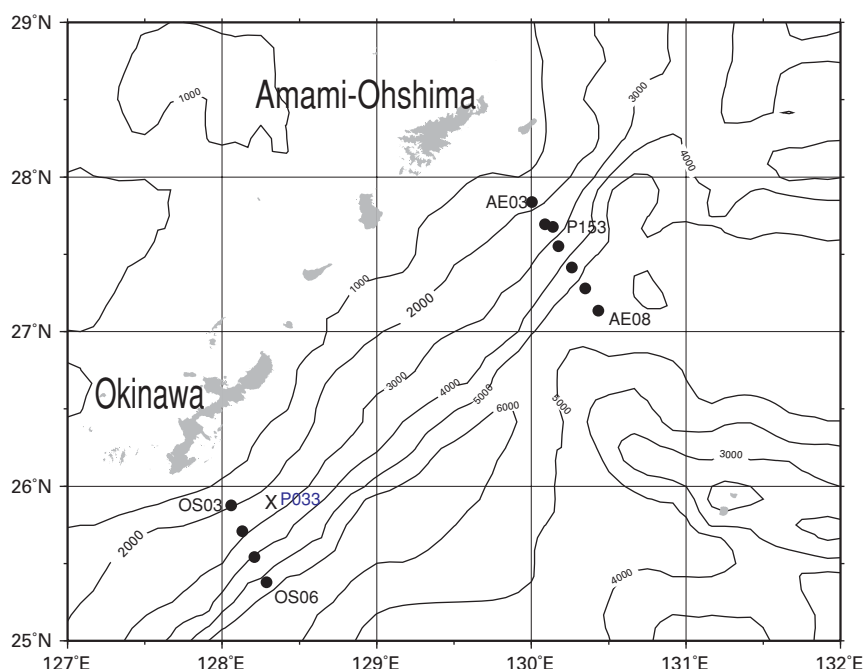


図1 XBTとCTDの同時観測点分布。●は今回データとして使用した観測点を示す。

Fig. 1 Distribution of simultaneous observations of XBT and CTD. The black circles show the observation points used in this study.

3. 観測深度誤差

図2はCTD/XBT同時観測による水温プロファイルと水温勾配プロファイルである。水温プロファイルでは、XBTが計測する水温がCTDによる水温より低くなる、もしくは等温線深度が深くなる傾向を示している。水温のバイアス誤差が除かれている水温勾配プロファイルでは、XBTの計測深度が深くなる傾向を示している。

観測深度誤差を見積もる方法としては、水温を比較する方法と水温勾配を比較する方法がある(Hanawa and Yoritaka, 1987³⁾; Hanawa and Yasuda, 1992⁴⁾)。図2の水温勾配プロファイルが観測深度誤差の存在を示していることと、扱いがより簡便なことから、本研究では水温を比較する

ことにより観測深度誤差を見積もった。

図3はXBTの観測深度誤差分布である。メーカ提供の時間-深度変換式による深度では表層部分から正の誤差、すなわちCTDによる観測深度よりも深い値が示されており、約200m深からメーカの公称誤差を超えている。主な深度における観測深度誤差は、600m深で+20m、1000m深で+50m、最深部では+100mに達する。

また、今回観測したデータをBL1993²⁾の時間-深度変換式に基づいた深度変換を施して同様に観測深度誤差を見積もった。BL1993²⁾の時間-深度変換式は、

$$z = 6.705t - 0.001619t^2$$

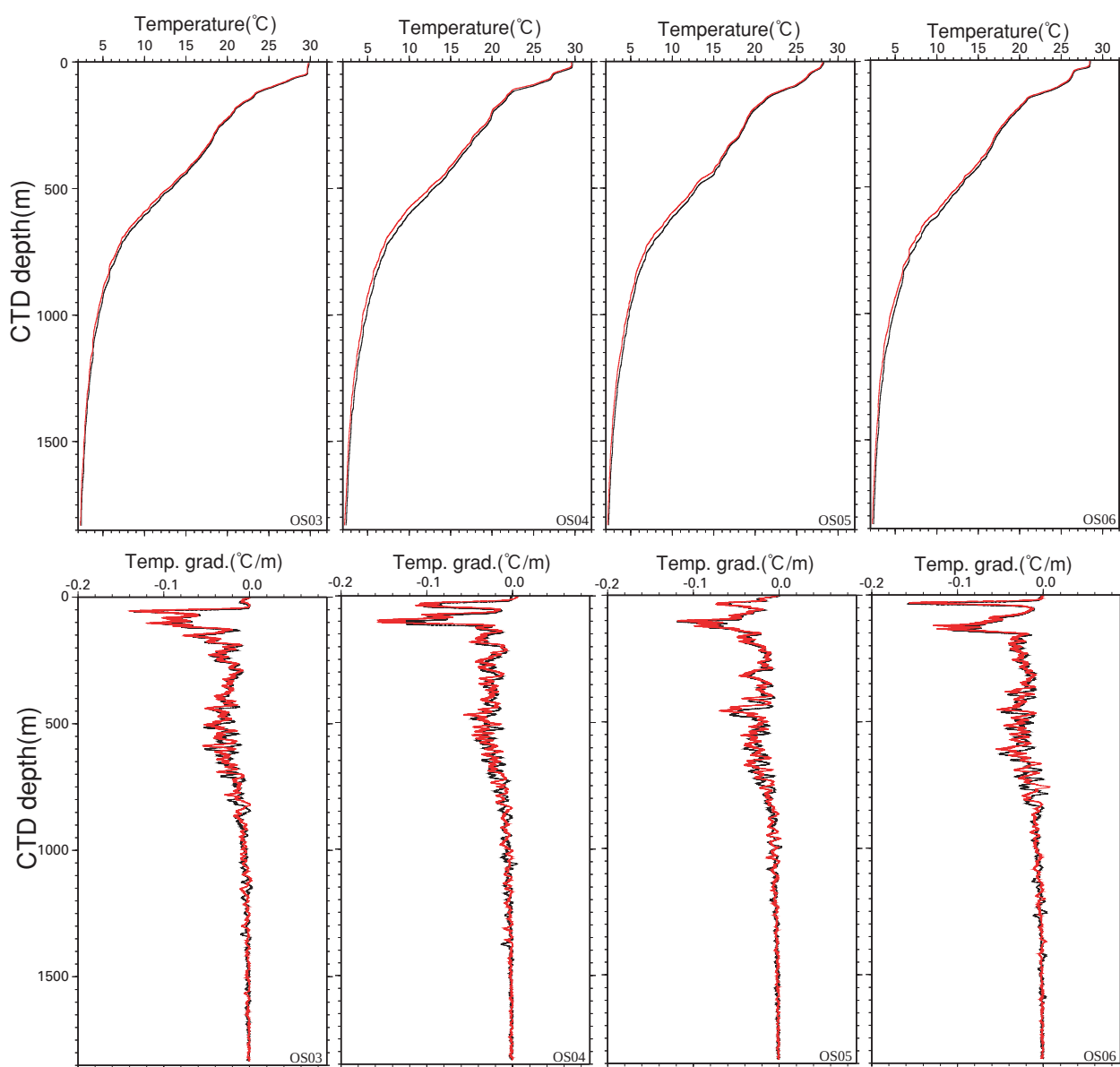


図2 上) CTD (赤)とXBT (黒) の水温プロファイル。

下) CTD (赤)とXBT (黒) の水温勾配プロファイル。

Fig. 2 (Top) water temperature profiles of CTD data (red line) and XBT data (black line) and (Bottom) water temperature gradient profiles of CTD data (red line) and XBT data (black line).

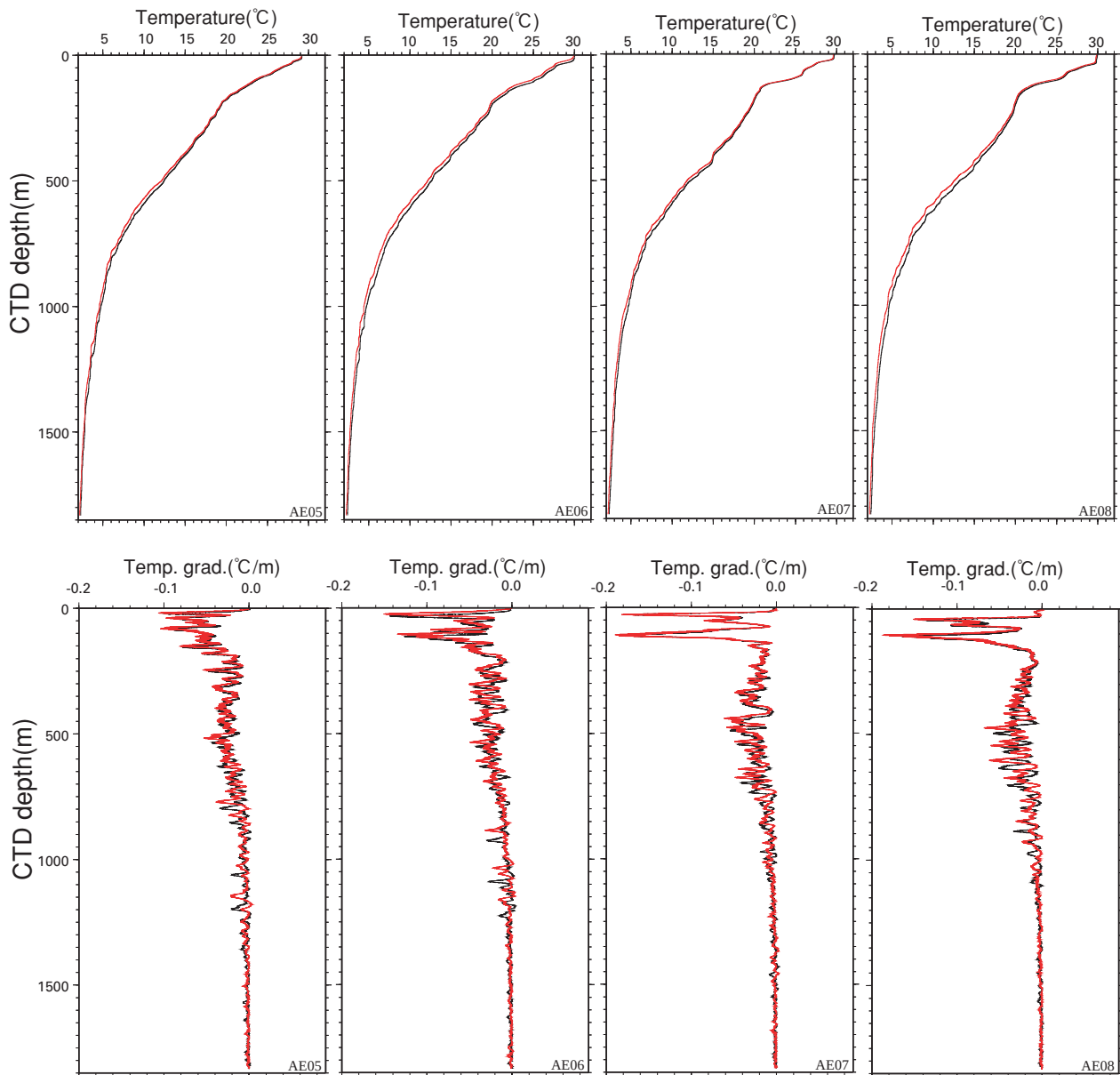


図2 (続き)
Fig. 2 (Continue)

である。BL1993²⁾の時間-深度変換式による深度では、少しの改善はあるものの、CTDによる観測深度よりも深い値が示される傾向は変わっていない。700m深を越えるあたりから、メーカーの公称誤差を超える観測深度誤差が計測されている。主な深度における観測深度誤差は、1000m深で+30m、最深部では+80mである。これらの誤差は、メーカーの公称誤差を大きく超えており、許容出来るものではない(図4)。

一方、Kizu and Hanawa (2003⁵⁾、以下KH2003)によっても時間-深度変換式の改訂が試みられており、

$$z = 6.4751t - 0.00175t^2$$

と見積もられている。この時間-深度変換式では、最深部における観測深度誤差ではかなり改善されているが、600m

深で観測深度が浅めに見積もられる傾向があり、公称誤差を超えていた(図5)。

4. 深度変換式

メーカー提供の時間-深度変換式およびBL1993²⁾の時間-深度変換式による観測深度の見積もりでは、明らかに許容範囲を超える誤差が見られるので、新たに時間-深度変換式を見積もった。今回のXBT/CTDの比較観測データから最小2乗法によって新たに見積もった時間-深度変換式は、

$$z = 6.622t - 0.00230t^2$$

となった。この時間-深度変換式の観測深度誤差を見積

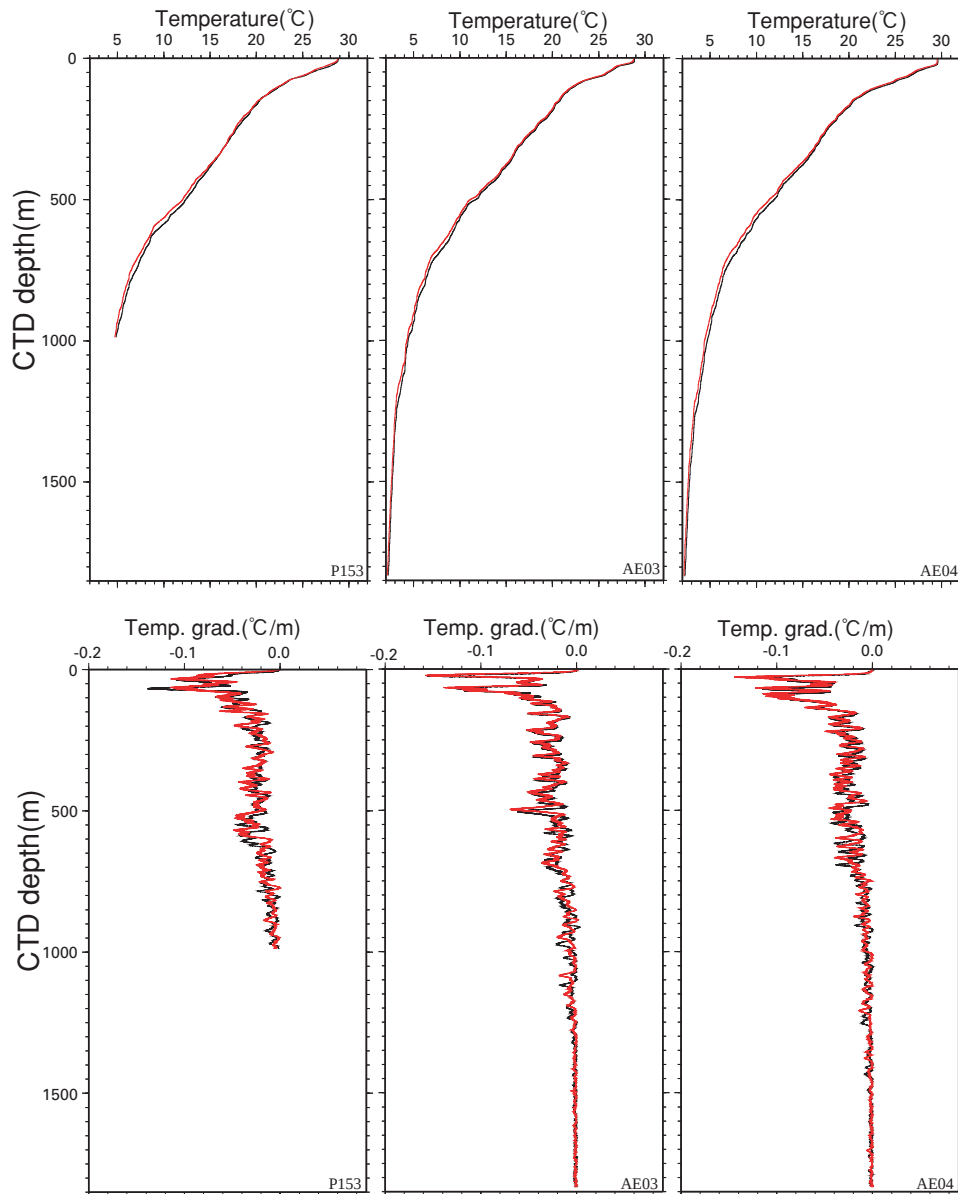


図2 (続き)
Fig. 2 (Continue)

もったところ、ほぼ誤差はなくなり、最深部で約10mとなった(図6)。

今回見積もった時間-深度変換式は、BL1993²⁾やKH2003⁵⁾の時間-深度変換式とは少々異なる。今回の観測海域は奄美大島南東海域および沖縄本島南東海域のみであるが、KH2003⁵⁾では房総沖(1994年9月観測)、フィリピン東方沖(1995年1月)、アリューシャン列島(1995年7月~8月)および三陸沖(2002年1月~2月)と観測海域・観測時期が様々なデータを用いている。木津(私信)ではKH2003⁵⁾によるデータで見積もった最深部における観測深度誤差はそれぞれで異なっており、この違いについては観測海域由来のものなのか、あるいはXBTプローブの製造時期が異なることに由来するものなのかについては確定していない。

なお、木津(私信)において、KH2003⁵⁾の時間-深度変換式の係数については、

$$z=bt-at^2$$

において、

$$a=0.00175 \pm 0.00117$$

$$b=6.4751 \pm 0.2247$$

としており、今回見積もった時間-深度変換式の各係数はこの範囲内にある。

今回使用したT-5型XBTプローブは鶴見精機製である。また、KH2003⁵⁾で使用したT-5型XBTプローブも鶴見精機

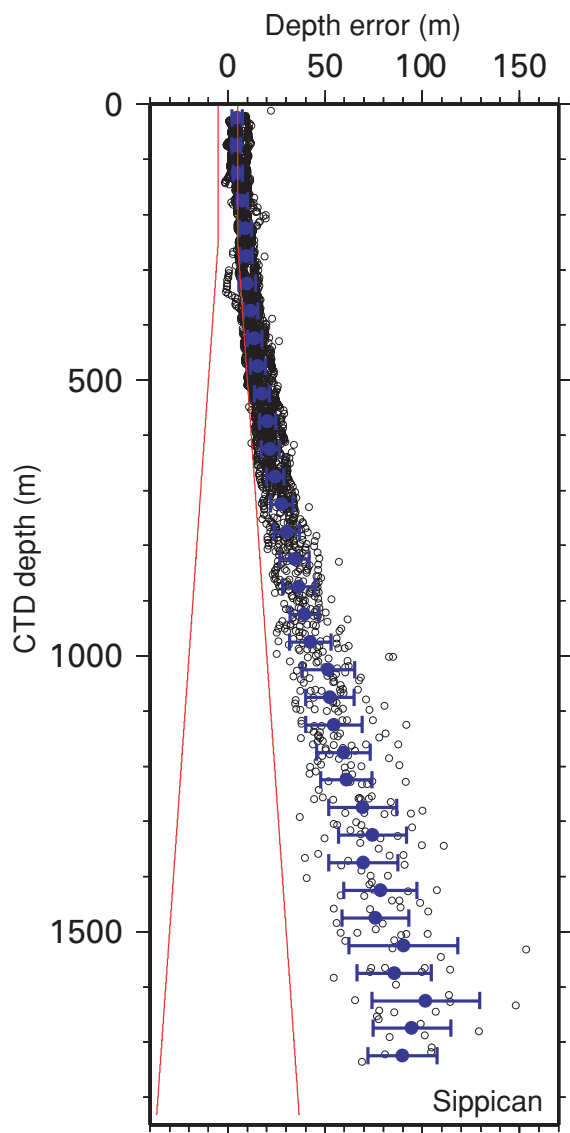


図3 メーカー提供の時間－深度変換式による水深観測誤差分布。●および青線は水深20m毎の平均水深観測誤差と標準偏差。赤線はメーカーの公称深度誤差(5mまたは2%)。

Fig. 3 Scatter chart of the difference between the CTD depth and the XBT depth calculated from the equation provided by the XBT manufacturer. The blue circles and blue lines respectively show the mean depth difference and the standard deviation. The red solid line shows the manufacturer's nominal depth error (5m or 2%).

製である。一方、BL1993²⁾ではSippican製のT-5型XBTプローブを使用して時間－深度変換式を求めている。KH2003⁵⁾によると、Sippican製のT-5型XBTプローブとメーカー提供の式を用いた観測データでは系統的な観測深度誤差は生じていないとしている。鶴見精機製のプローブとSippican製のプローブの間でこれほどの差が出ることは考えにくく、時間－深度変換式の相違の原因については、今後の更なる調査・検討が必要である。

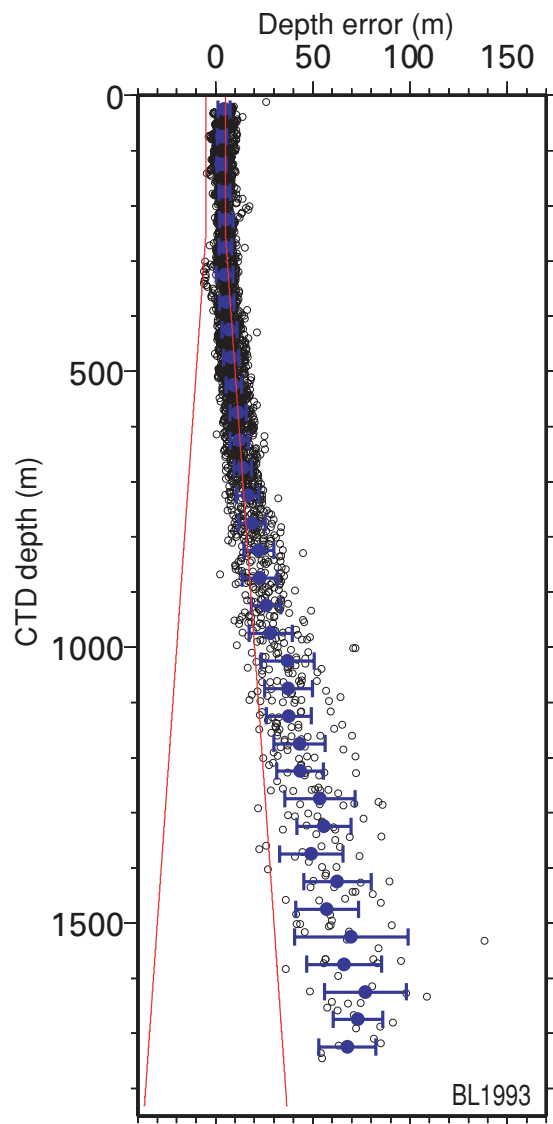


図4 BL1993²⁾提案の時間－深度変換式による水深観測誤差分布。
Fig. 4 Scatter chart of the difference between the CTD depth and the XBT depth calculated according to the equation provided by BL1993.

5. まとめ

本研究では数種類あるXBTの中で最も深くまで観測可能なT-5型XBTプローブによる観測データとCTD観測データとを比較することによりT-5型XBTの観測深度誤差の検討を行った。その結果をまとめると、

- 1) メーカー提供の時間－深度変換式を用いた場合、最深部で約100m深い値が観測深度として設定される。
- 2) BL1993²⁾の時間－深度変換式を用いた場合、最深部で約80m深い値が観測深度として設定される。
- 3) メーカー提供の時間－深度変換式とBL1993²⁾が提案した時間－深度変換式では公称誤差である5mまたは2%を越えている。
- 4) KH2003⁵⁾が提案した鶴見精機製の時間－深度変換

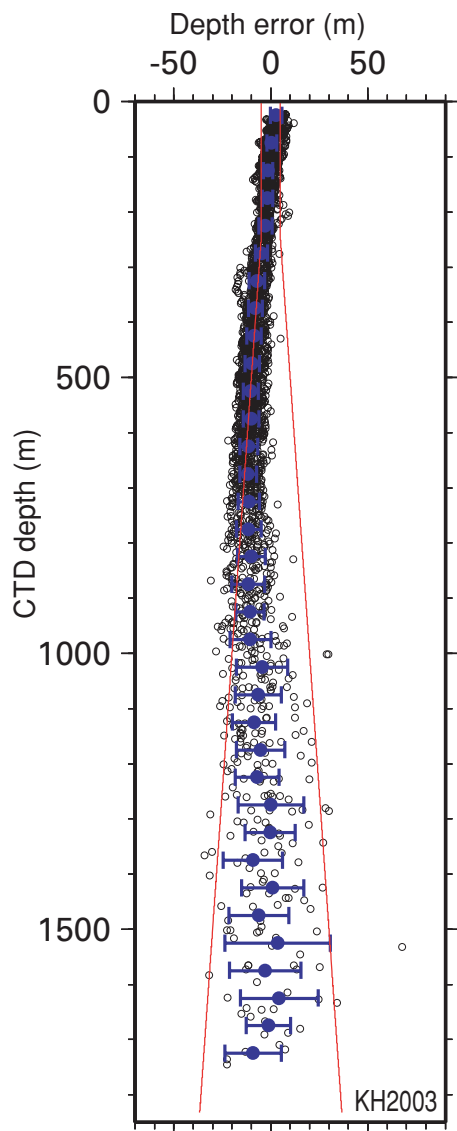


図5 KH2003³⁾提案の時間－深度変換式による水深観測誤差分布。
Fig. 5 Same as Figure 4, except for the equation provided by KH2003.

式では最深部の誤差は小さくなったが、600m付近で観測深度が浅く見積もられる。

- 5) 新たに見積もった南西諸島南東海域での時間－深度変換式は、

$$z = 6.622t - 0.0023t^2$$

となった。本変換式の誤差は最深部で約10mである。

現在の所、T-5型XBTプローブの普遍的な時間－深度変換式は、メーカ提供の変換式を除いて提案されていない。普遍的な変換式を求めるためには、より多くの海域で行われた、あるいはより数多くのXBT/CTDの同時観測資料が必要である。本研究では南西諸島南東海域において12点のXBT/CTDの同時観測資料を用いて行ったものである。今回の結果やKH2003⁵⁾あるいはBL1993²⁾の結果を含めてT-5

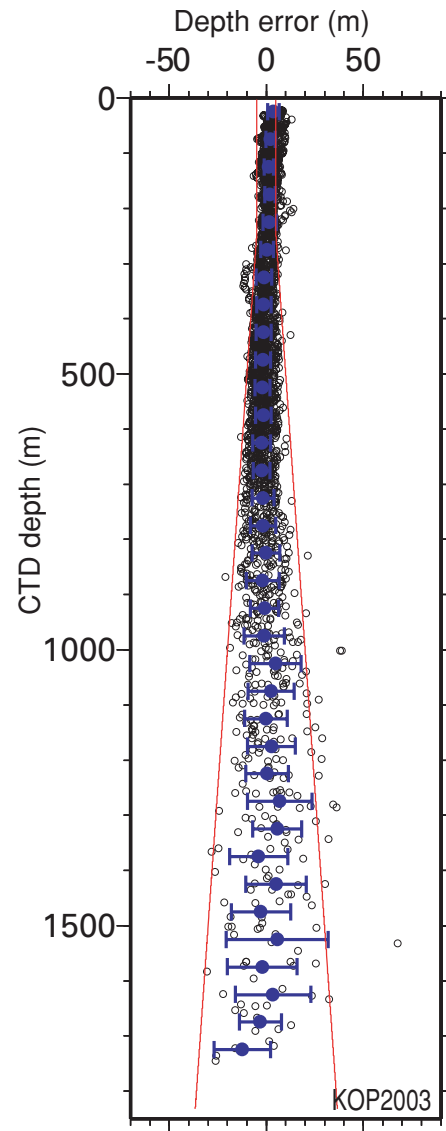


図6 本研究で求めた時間－深度変換式による水深観測誤差分布。
Fig. 6 Same as Figure 4, except for the equation provided by this study.

型XBTプローブのより普遍的な時間－深度変換式が将来求められることが期待される。一方でXBTプローブの製造メーカによってプローブの落下速度が異なる可能性も指摘されており、今後、さらなる調査・検討が必要な課題である。

謝辞

今回XBT/CTDの同時観測を行うにあたり、船上にて多大なるご支援を頂きました長崎大学水産学部練習船鶴洋丸の船長秋重祐章教授以下乗組員の皆様に感謝いたします。観測準備に当たっては(株)マリンワークジャパン海洋科学部の小林不二夫氏、片山健一氏、吉池美希女史および当グループ観測推進スタッフ小浜和公氏のご支援を頂きました。本研究においては当グループ研究員朱小華博士より提言を頂きました。最後に本研究・観測はフロンティア研究推進室

の堀田平室長, 白石綾部員をはじめとする推進室スタッフの皆様のご用意周到な準備により円滑に実施出来, 無事終了することができました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Hanawa, K., P. Rual, R. Bailey, A. Sy, and M Szabados, "A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT)", *Deep-Sea Res.*, Vol. **42**, 1423-1451 (1995).
- 2) Boyd, J. D., and R. S. Linzell, "The temperature and depth accuracy of Sippican T-5 XBTs", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. **10**, 128-136 (1993).
- 3) Hanawa, K., and H. Yoritaka, "Detection of systematic errors in XBT data and their correction", *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. **43**, 68-76 (1987).
- 4) Hanawa, K., and T. Yasuda, "New detection method for XBT depth error and relationship between the depth error and coefficients in the depth-time equation", *J. Oceanogr.*, Vol. **48**, 221-230 (1992).
- 5) Kizu, S., and K. Hanawa, "A new fall-rate equation for the Japanese T-5 XBT probes", *IUGG 2003 Abstract*, **B**, 95 (2003).

(原稿受理: 2003年11月25日)