

XCTD-2Fの深度換算式較正の試み

社 泰裕, 石井春雄, 藤田雅之:航法測地室
加藤弘紀:測量船海洋

An examination of the depth conversion formula of XCTD-2F

Yasuhiro Koso, Haruo Ishii, Masayuki Fujita :Geodesy and Geophysics Office
Hiroki Kato: Hydrographic survey vessel Kaiyo

1 はじめに

海洋情報部では、KGPSによる測量船の測位と、船と海底基準局（トランスポンダー）との間の海中音響測距を組み合わせる手法により、海底基準局の位置を精密に決定し、海底地殻変動を検出するための観測を実施している。

海底基準局の位置決定に誤差を与える一因として、海中の音速構造の測定誤差がある。海中の音速構造は、音波の伝播時間から船上局と海底局の距離を求めるのに必要不可欠であり、精密に海底局の位置を決定するためには、高精度に把握する必要がある（佐藤・藤田，2004）。

現在、1日の音響測距観測の前後に1度ずつCTD（Sea-Bird社製のSBE-19）観測を行うことにより音速度構造を求めているが、この間約1時間毎にXBT観測を行うことによりその時間変化の把握に努めている。

最近では、XBTの他にXCTDを使用している。音速度を求めるためには、深度、水温、塩分のデータが必要だが、XBTは、深度と水温しか測ることができない。XBTの塩分については、観測前後のCTDから得られた塩分を線形補間したものを使っている。それに比べXCTDは塩分も測定することができるためより有効である。なお、XCTDは、鶴見精機社製（XCTD-2F）で、深度約1950mまで測定することができる。

CTDは、圧力センサーを持っており、水圧を変換

することによって深度を決めているが、XBT及びXCTDは、圧力センサーを持たず、海中を自由落下する経過時間から直接深度を求める方式である。現在使われているXBT（T-5）の深度換算式については、Kizu et al.（2005）によって公称の式が見直されているが、XCTD-2Fについては、まだ公称式の検証が行われていない。そこで2004年4月～7月の海底地殻変動観測で、XCTDの深度の精度検証のため、CTD・XCTDの同時観測を行った。

本稿では、海底地殻変動観測で実施したCTDとXCTDの同時観測によって得られたデータを比較し、CTDの深度を真値として、これにより近くなるようにXCTDの深度換算式を較正したので報告する。

2 XCTDデータについて

2.1 現在の深度換算式

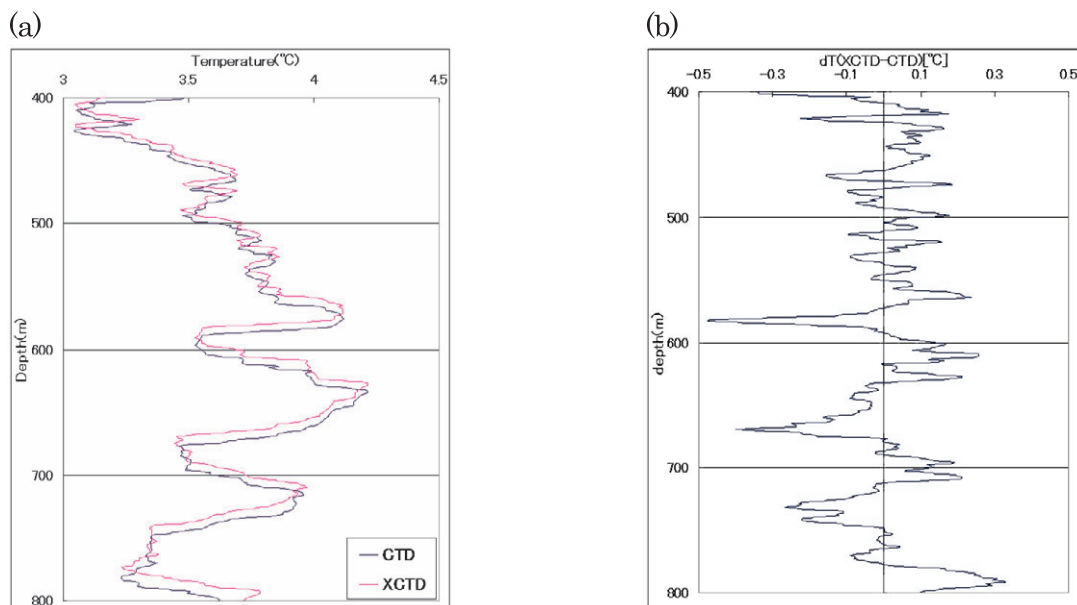
XCTD-2Fの深度換算式は、

$$D_x = At - Bt^2 \dots\dots\dots [1]$$

で表現される。

ここで、 D_x はXCTDの深度（m）、 t は着水からの経過時間（秒）で、現在の鶴見精機社製の公称の係数は、 $A=3.3997$ 、 $B=0.00030$ が使用されている。

式[1]は、プローブが毎秒3.3997mずつ落下し、これにともないワイヤーが繰り出された分が軽くなって落下速度が僅かずつ低下することを意味する。



第1図 CTD・XCTDの比較観測（2004年4月26日，宮城沖）。
 (a)：水温プロファイル (b)：(a) の水温差のプロファイル
 Fig. 1 CTD-XCTD simultaneous observation (April 26, 2004, off Miyagi).
 (a)：Vertical profiles of water temperature (b)：Water temperature difference in (a)

2.2 観測データ

2004年4月～7月の海底地殻変動観測で、CTDとXCTDの同時観測を行ったのは、宮城沖（4月，5月），潮岬沖2（6月）・東海沖2（7月）・潮岬沖1（7月）・東海沖1（7月）の5海域であり，得られた35対の同時観測データについて検討した。なお，これらの同時観測では，CTD観測を開始してから5分後にプローブを投下した。これは，深度約400mでプローブがCTDに追いつく時間となっている。

第1図は，2004年4月26日に宮城沖で実施したCTD・XCTD同時観測による水温プロファイルと，その水温差のプロファイルである。いずれも差が顕著に見られる400m～800mの範囲を抽出した。

第1図 (a) の水温プロファイルを見ると，対応する極値が現れ，XCTDの方が浅いことが分かる。深度差は，800m付近で約10mになる。第1図 (b) は，水温差を示したものだが，XCTDが同じ水温でも深度が浅いため，CTDとの水温差にばらつきがあることが分かる。

他のデータを比較してもXCTDの水温極値の方がCTDよりも浅いところに現われる傾向がある。そこで，XCTDの深度換算式を見直すことによって，

XCTDの水温値をCTDとできるだけ同じ深度の水温値にすることを試みる。その手法を次に説明する。

3 手法

3.1 水温データの平滑化

CTDとXCTDの水温値の短波長成分を取り除き，平滑化する。平滑化の方法として，CTDの水温値 (Tc) 及びXCTDの水温値 (Tx) に15個のメディアンフィルターをかけた。それにより，エラーデータの除去ができ，互いの対応する極値を判別しやすくすることができる。

3.2 水温変化率の導出

3.1で求めた1mごとの水温から，CTD水温の深度 (Dc) に対する変化率 ($\Delta Tc / \Delta Dc$)，XCTDの深度 (Dx) に対する変化率 ($\Delta Tx / \Delta Dx$) を1mごとに計算し，これらの鉛直プロファイルを描画する。

鉛直プロファイルから，互いに対応している極値が出現する深度をリストアップする。なお，水深が約1000m以上になると，水温の変化がほぼ一定であるため，極値を取る範囲は1000mまでとした。

3.3 深度換算式の係数の計算

- 1) 3.2でリストアップした水温鉛直変化率の極値が対応する各データ対の深度Dxから，XCTDの投下後（海面着水後）の経過時間t（秒）を求める．経過時間t（秒）は，公称の深度換算式 $Dx = 3.3997t - 0.00030t^2$ …………… [2] を解くことにより求める．
- 2) 1) で求めたtを $Dc = At + Bt^2$ に代入し，全データ対について $\sum \{Dc - (At + Bt^2)\}^2$ を最小にする AcorとBcorを求める（最小二乗法）．
- 3) 式 [2] を新しい深度換算式 $Dx_{cor} = Acor t + Bcor t^2$ に換え，補正したXCTDの深度（Dxcor）を求め，Dxcorに対する水温，電気伝導度，塩分データを作成する．

4 結果

4.1 新しい深度換算式の係数

第2図は，水温データを平滑化した後の1mごとの水温変化のプロファイルである．このプロファイルから対応する極値を探す際，宮城沖は，黒潮と親潮の入り混じる海域であり，第2図(a)のように1mごとの水温の変化が激しい海域のため，極値を探

すのは容易である．一方，東海沖，潮岬沖は，黒潮に近いので，第2図(b)のように水温の変化が一定である．その為，水温の変化がほとんどマイナス方向であり，互いの極値を判断することが難しかった．

最終的に，宮城沖の12回，潮岬沖2の8回の同時観測におけるデータを使用し，係数Acor, Bcorを算出した．なお，使用した極値の個数は，宮城沖が93個，潮岬沖2が41個である．海域別に係数を求めた結果，

宮城沖 : Acor = 3.4288 Bcor = 0.00027
 潮岬沖 2 : Acor = 3.4482 Bcor = 0.00031

が得られた．

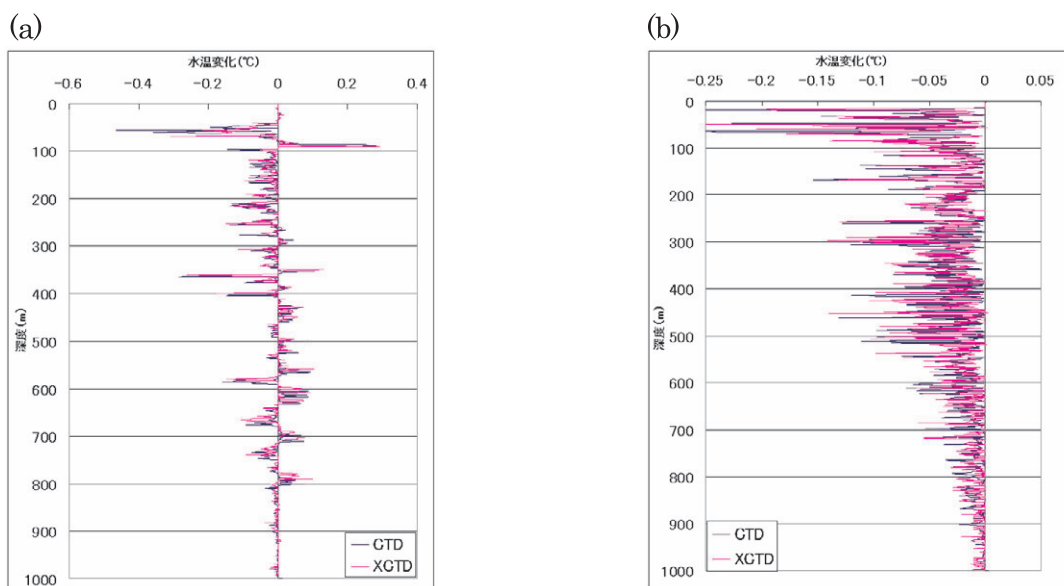
これらの係数の差は，例えば1650m付近で約20cmである．XCTDのプロープにおける測定深度は，深度の約2%であるので，この差は気にする必要はない．よって新しい深度換算式は，両海域のデータを全て使用することにより，

Acor=3.4390 Bcor=0.00031

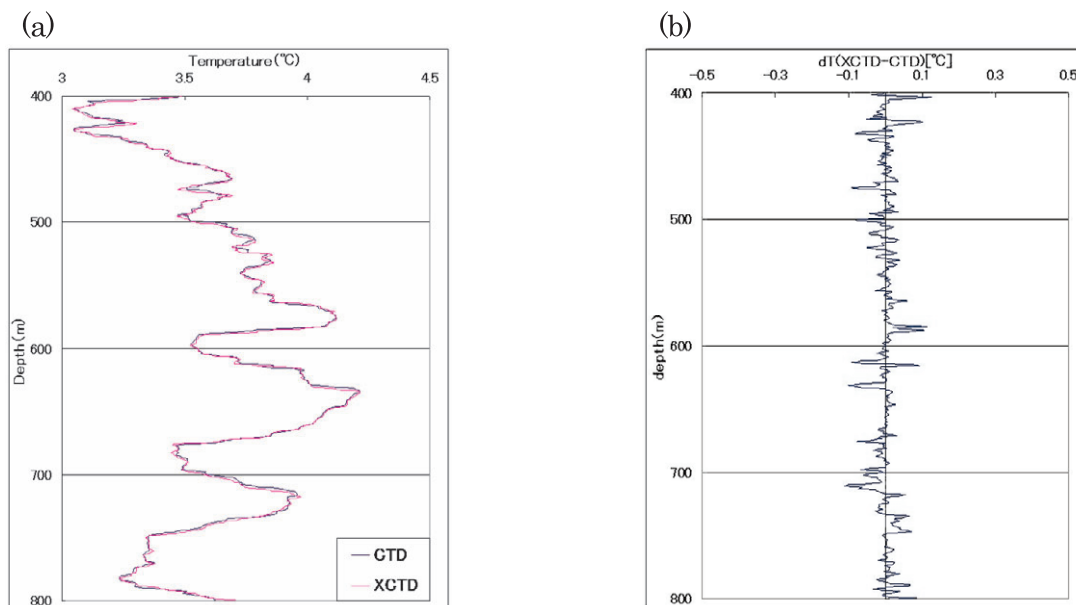
を最終的な解とした．

4.2 新しい深度換算式の適用結果

第3図は，第1図(a)，(b)に示したXCTDデー



第2図 1mごとの水温変化.
 (a) : 2004年4月26日，宮城沖 (b) : 2004年7月5日，東海沖
 Fig. 2 The water temperature change in every 1m depth.
 (a) : April 26, 2004, off Miyagi (b) : July 5, 2004, off Tokai



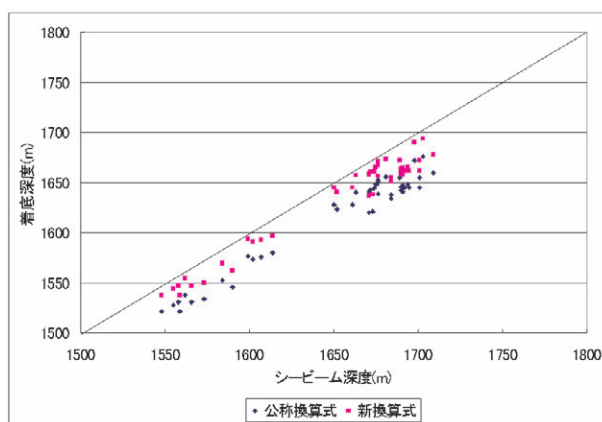
第3図 CTD・XCTDの比較観測（2004年4月26日,宮城沖）.XCTDには新しい深度換算式を適用。
 (a)：水温プロファイル (b)：(a) の水温差のプロファイル

Fig. 3 (a) : CTD-XCTD simultaneous observation (April 26, 2004, off Miyagi). The new depth conversion formula is applied to XBT.
 (a) : Vertical profiles of water temperature (b) : Water temperature difference in (a)

タについて新しい深度換算式を適用したものである。第3図(a)を見ると公称の式を用いた場合第1図(a)よりも、CTDのプロファイルとかなり一致していることが分かる。また、第3図(b)のCTDとXCTDの差もほぼ、0.1℃の範囲内に収まっている。

第4図は、シービームの深度とXCTDの着底深度の関係を示したものである。青点が公称の換算式、赤点为新換算式である。この図からシービームの深度を真値とした場合、公称換算式による着底深度は20~30m浅くなっていることが分かる。また、新換算式による着底深度は公称換算式より約20m深いことが分かる。

シービームを真値とするならば、新換算式にもまだ数mのバイアスがあるように見える。この原因として、深度換算式の係数を1000mまでの水温変化の多い深度で決めているため、1600mの深さでは十分な精度を持っていないということが考えられる。しかし、シービーム自体がバイアスを持っている可能性もないとは言えない。

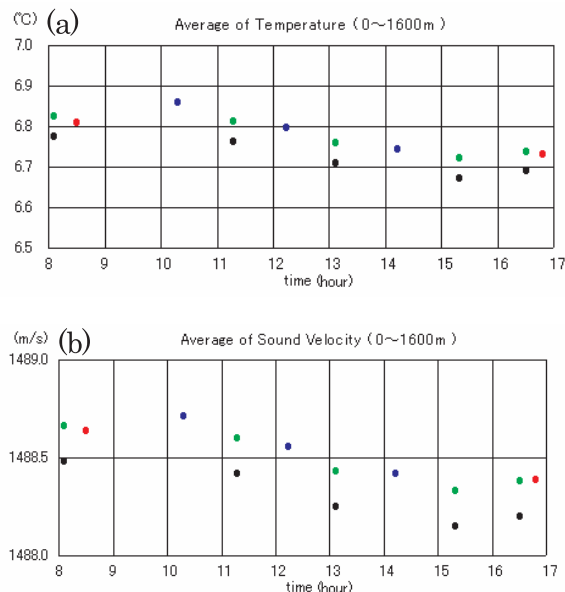


第4図 シービームの深度と2つの換算式による着底深度の関係。

Fig. 4 Relation of arrival bottom depth by depth of Sea Beam and two conversion types.

4.3 新換算式と公称換算式の平均音速度の差

第5図(a),(b)は、2004年7月7日に観測した潮岬沖の0~1600mの平均水温と平均音速度の半日間の変化を表示したものである。赤丸はCTD観測、青丸はXBT観測を示す。ここでXBTについてはKizu et al. (2005)の深度換算式により更正した水温値である。黒丸は、XCTD観測の公称換算式によ



第5図 (a) 平均水温の時間変化
(b) 平均音速度の時間変化
(2004年7月7日潮岬沖) 赤:CTD 青:XBT
緑:新換算式によるXCTD 黒:公称換算式によるXCTD

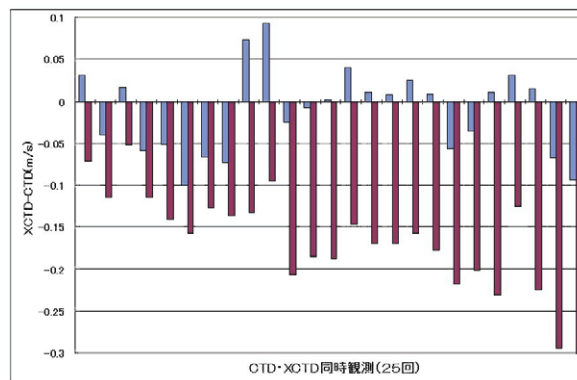
Fig. 5 (a) Time change of degree of average water temperature (b) Time change of degree of average sound velocity (July 7, 2004 off Shiono-misaki)
Red:CTD Blue:XBT Green:XCTD of new conversion formula Black:XCTD of nominal conversion formula

る値、緑丸はXCTD観測の新換算式による値を示している。

これらの変化を見ると、公称のXCTDでは、平均水温が約0.05°C、平均音速度が約20cm/s新換算式よりも小さい値になる。新換算式によるXCTDの値は、CTDとXBTの値にかなり近づいたことが分かる。

第6図は、CTDとXCTDの同時観測（25回）における平均音速度の差を、公称換算式（赤）と新換算式（青）についてそれぞれ示したものである。図から、公称換算式によるXCTDの平均音速度は、CTDの平均音速度に比べ、系統的に10cm/s~30cm/s小さいことが分かる。

それに比べて、新換算式によるXCTDとCTDの平均音速度の差は、約10cm/s以内に収まっている。



第6図 CTD, XCTD同時観測時の平均音速度の差.
XCTDは青:新換算式, 赤:公称換算式
Fig. 6 Difference of the degree of average sound velocity at the time of CTD and XCTD simultaneous observation.
Blue : new XCTD conversion formula
Red : nominal XCTD conversion formula

5 まとめ

本稿では、CTDとXCTDの同時観測により得られたデータを用いて、XCTDの深度換算式の修正を行った。その結果、XCTDの深度換算式は、 $Dx = 3.4390t - 0.00031t^2$ が得られた。これによるXCTD - 2Fのプロープ降下率は、公称換算式のそれより大きく、例えば深度1600m付近で、新換算式の方が約20m深くなる。

XCTDは、CTDと比較すると、平均水温が約0.05°C、平均音速度は10~30cm/s低かったが、新換算式を適用するとこれらの系統的なバイアスはなくなった。

新しい深度換算式によるXCTDデータを使うことによって、海底基準局を決定するための音速度の精度があがったといえる。

海底地殻変動観測に必要な精度が、XCTDでも得られることが分かれば、CTD観測に代わり有効な手段となる。

参考文献

Kizu S., H. Yoritaka and K. Hanawa : A New Fall-Rate Equation for T- 5 Expendable Bathythermograph (XBT) by TSK,

J. Oceanogr., **61**, No1, 115-121 (2005)

佐藤まりこ, 藤田雅之: 海底地殻変動観測における
海中音速誤差の局位置への影響について, 海
洋情報部技報, **22**, 42-49, (2004)