

デジタル転倒温度計・圧力計の基本特性

林 美鶴^{*1} 河野 健^{*2}
柏野 祐二^{*2} 青山 道夫^{*3}

近年、採水器に取り付けて採水層の水温・圧力を計測するための、デジタル温度計・圧力計が普及し始めている。これは従来から使用されている水銀式転倒温度計よりもレスポンスが良く、温度計は1/1,000deg-Cの桁まで、圧力計は1 dbarの桁まで表示できる。

海洋科学技術センターでも1994年以来、WOCEやTOCSでのRosette採水の際に使用しており、これら実海域における観測結果から、デジタル転倒温度計・圧力計の基本特性を明らかにした。

総数97本の転倒温度計・圧力計のうち27本が、50キャスト未満で異常を示した。転倒温度計は1本ごとに特性が異なった。転倒圧力計は概ね仕様を満足していたが、一部で深度に対するバイアスの存在が示唆された。転倒圧力計は、深層で採水間隔を100m程度にすれば、正しく採水されたかの目安として使用可能である。総じて、使用目的や必要精度を考慮して利用することが望まれる。

キーワード：転倒温度計・転倒圧力計・採水

The basic characteristics of a digital reversing thermometer (RTM) and pressure meter (RPM)

Mitsuru HAYASHI^{*4} Takeshi KAWANO^{*5}
Yuji KASHINO^{*5} Michio AOYAMA^{*6}

Recently, the digital reversing thermometer (RTM) and pressure meter (RPM) to measure the water temperature and pressure of a sampling layer have been used. They have better response than a mercury thermometer which used previously. The resolution of the RTM is 1/1,000 deg-C, and that of the RPM is 1 dbar.

Since 1994, the RTMs and RPMs have been used with a rosette sampler in WOCE and TOCS project in JAMSTEC. We investigated the basic characters of RTM and RPM such as durability, stability and accuracy using ocean observation results.

* 1 神戸商船大学 (当時日本海洋事業(株))

* 2 海洋観測研究部

* 3 気象研究所 (当時海洋観測研究部)

* 4 Maritime University of Kobe (Nippon Marine Enterprises, LTD)

* 5 Ocean Research Department

* 6 Meteorological Research Institute (Ocean Research Department)

Twenty-seven of the 97 RTMs and RPMs became unavailable less than 50 casts. Because the character of every RTM is different, it is necessary to select the good RTMs. Although stability and accuracy of the RPMs satisfied the maker's specifications mostly, results from some RPMs show pressure bias. The RPM will be able to use as a guide, when the sampling interval is about 100m.

The RTM and RPM should be used carefully considering the observation and the accuracy required in the observation.

Key Words : Reversing thermometer, Reversing pressuermeter, Water sampling

1 はじめに

各層採水の際に、採水層の水温を計測するための転倒温度計は古くから用いられてきた。現在も一般的に用いられている転倒温度計は水銀棒温度計を改良したもので、採水器に取り付けられた転倒温度計が採水と同時に180度回転し、水銀の一部が途切れることによって、その時点での水温を保持する仕組みとなっている。このような転倒温度計では計測値に対して温度補正が必要であり、また採水深度の決定にも複雑な計算が必要となる。さらに、正確な水温計測のためには、採水・転倒の前に採水層で約5分間停止しなければならない。また密度計算などに用いるために、計測値は1/100deg-Cまで読みとることになっている¹⁾。

一方近年になって、1/1000deg-Cの桁まで表示できるデジタル転倒温度計や、1dbarの桁まで表示できるデジタル転倒圧力計が登場した。これらは従来型と同様に採水器に取り付けて使用し、採水と同時に180度回転することでトリガーがかけられる。転倒後、約15秒間計測を行い、最終計測値を内部メモリーに記憶する仕組みとなっているので、採水層で停止する時間が大幅に短縮できる。

デジタル転倒温度計・圧力計は主にRosette採水の際に使用され、海洋科学技術センターでも1994年以来、WOCE (World Ocean Circulation Experiment) や TOCS (Tropical Ocean Climate Study) などの研究航海で使用している。多くの海洋調査機関で普及し始めているが、特性に関する結果報告はまだない。そこで本研究では、実海域における観測結果を基に、デジタル転倒温度計・圧力計(以下、単に転倒温度計・圧力計と示す)の基本特性(耐用性・安定度・精度)を明らかにした。

2 観測・解析法

今回使用したのは、SIS社製デジタル転倒温度計(RTM

4002)・圧力計(RPM6000H, RPM10000H)で、圧力計は測定レンジ6,000dbarと10,000dbarの2種類がある。これらのメーカー公称の基本仕様を表1に示す。転倒温度計の分解能は、20deg-C未満の範囲では±1/1000deg-Cであるが、20deg-C以上の範囲では±1/100deg-Cと1桁落ちる。また精度も、20deg-C未満の範囲では±0.01deg-Cだが、20deg-C以上の範囲では±0.015deg-Cとやや劣る。転倒圧力計は6,000dbar級、10,000dbar級とも分解能±1.0dbar、精度±0.3%FSが示されている。

これらの転倒温度計・圧力計は1994年2月以降のWOCEやTOCSでランダムに使用されており、本報では主に1994年2月²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾、1995年1月⁵⁾、1996年6月⁶⁾に実施されたWOCEでの結果を用いて解析を行った。

表1 デジタル転倒温度計・圧力計の基本仕様

Table 1 Specification of digital reversing thermometer /pressure meter.

Reversing thermometer (RTM)

Type	RTM4002
Range	- 2.000 ~ 40.000 deg-C
Resolution	± 0.001 deg-C (-2.000 ~ 19.999 deg-C) ± 0.01 deg-C (20.00 ~ 40.00 deg-C)
Accuracy	± 0.01 deg-C (-2.000 ~ 19.999 deg-C) ± 0.015 deg-C (20.00 ~ 40.00 deg-C)
Stability	± 0.001 deg-C/month

Reversing pressure meter (RPM)

Type	RPM6000H	RPM10000H
Range	0 ~ 6,000 dbar	0 ~ 10,000 dbar
Resolution	± 1.0 dbar	± 1.0 dbar
Accuracy	± 0.3 %FS (± 18 dbar)	± 0.3 %FS (± 30 dbar)
Stability	± 0.01 %FS/month	± 0.01 %FS/month

観測時は転倒圧力計1本と転倒温度計2本の計3本を1セットとし、専用の転倒温度計・圧力計枠に入れてニスキン採水器に取り付けた。採水には、12ℓニスキン採水器を36本取り付けたCTD/Rosetteシステムを用いた。転倒圧力計で計測した圧力値には、観測前に甲板上で計測した大気圧を加味し、大気圧補正を行っている。また転倒温度計で計測した水温値には、検定によって求められた、計測水温に応じた補正値を加味している。安定度・精度を検討する上で、転倒温度計・圧力計が採水以前に途中転倒したり、故障などが明白なケースは不良データとして除外した。

転倒温度計・圧力計の安定度・精度は、CTD/Rosetteシステムに組み込んだSBE社のCTD (SBE911plus) によって検討した。このCTDの各センサーは、航海の前及び後にキャリブレーションがなされている。水温センサーの検定はメーカーにより実施された。また圧力センサーは河野ほか (1995)⁹⁾ が示す方法で、デットウェイト・テスターを用いて海洋科学技術センターにおいて実施された。取得したCTDデータは柏野ほか (1997)⁸⁾ が示す方法によって処理され、おおむね温度センサーについては0.001deg-C、圧力センサーについては1.0dbarの精度が認められた。

3 結果

3.1 耐用性

転倒温度計・圧力計の使用状況を、キャスト回数別に分類したものを表2に示す。

現在までに、総数97本中に見受けられる異常内容は計測値を表示する液晶画面の故障 (表示不良) が最も多く、人為的または製造不良などによる本体の破損や、原因は不明だが明らかに異常な計測値を示す、などが数例含まれる。

また使用不可能な46本中、27本 (全体の3割弱) が、50キャスト未満で異常が発生している。WOCEなどキャスト数が多い観測では、1～2レグで50キャスト程度こなす場合がある。一方で、総数97本中35本が50回以上のキャストで使用されており、この内100回以上のキャストに耐えたものが13本ある。

表2 転倒温度計・圧力計の使用状況
Table2 Condition of the RTM/RPM.

Number of cast	Available	Unavailable	Total
Less then 49 cast	35	27	62
More then 50 cast	16	19	35
Total	51	46	97

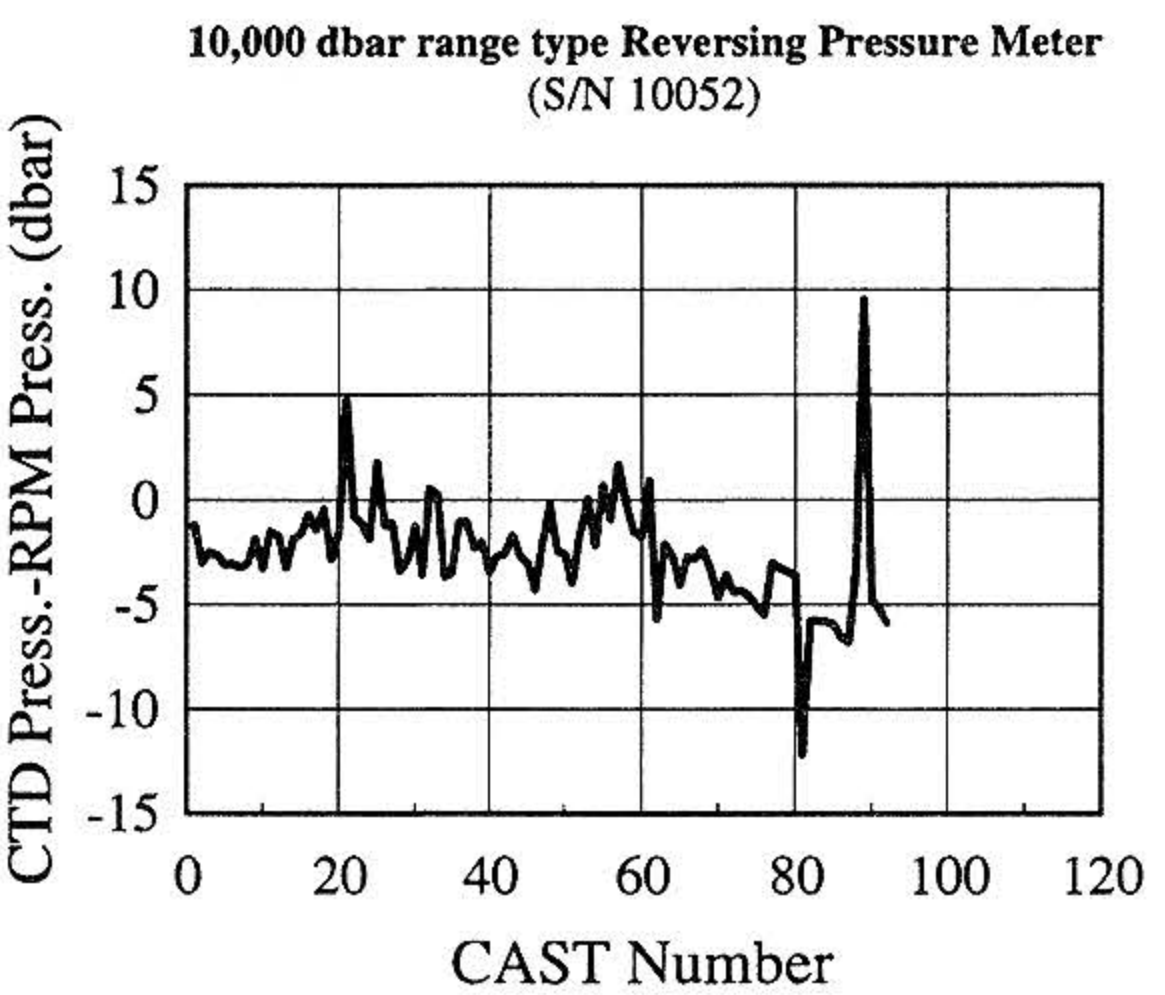
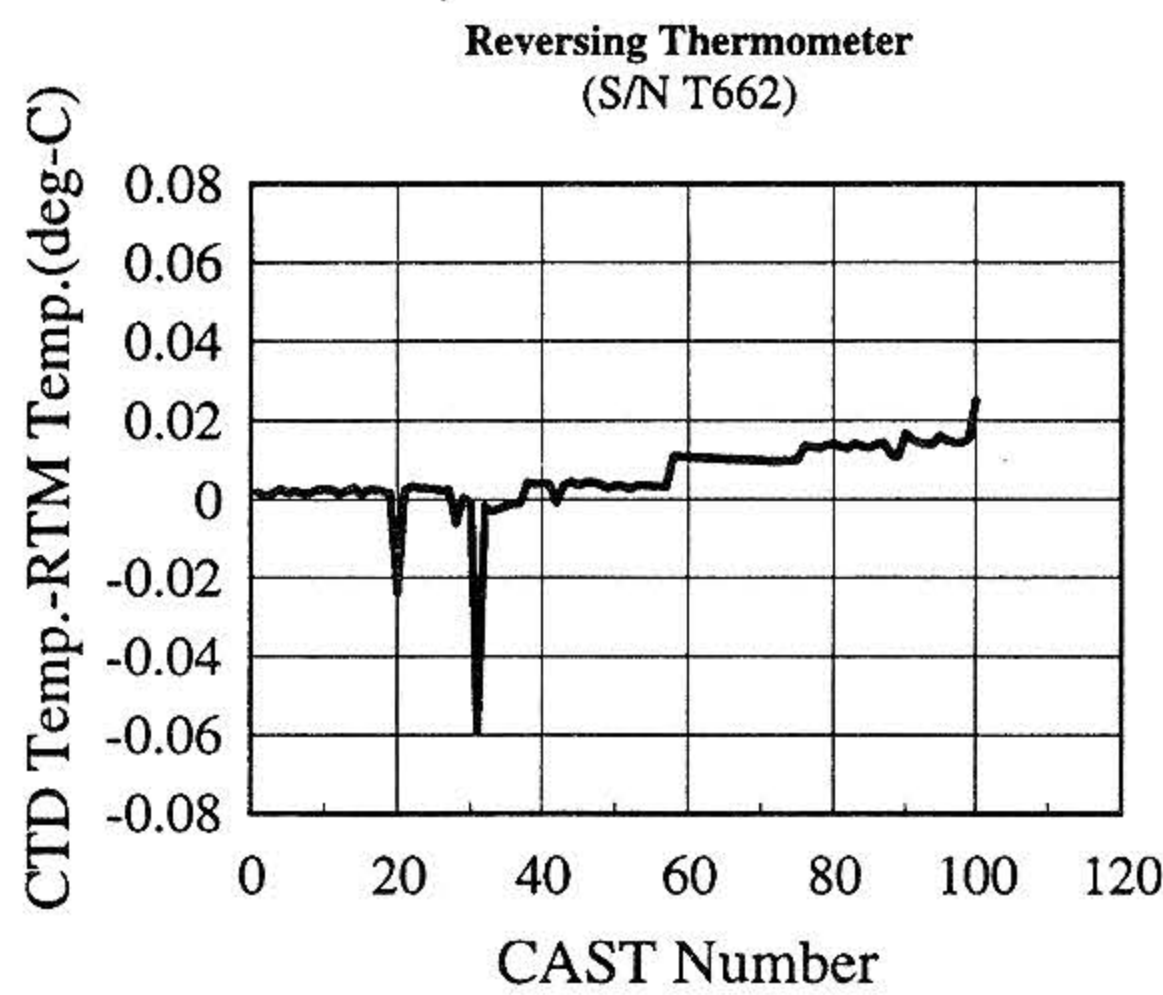


図1 転倒温度計・圧力計の計測の変化の例
横軸はキャスト回数、縦軸はCTDと転倒温度計・圧力計との温度・圧力差。
キャスト回数は等時間間隔ではないので、時間との関係を示すものではない。

Fig. 1 The example of the variation of measured value by RTM/RPM.
The X-axis shows cast number, and the Y-axis shows difference between RTM/RPM and CTD.
The cast number is not leguler interval, so X-axis do not mean time sires.

現在も使用中のものがあるため、現時点で耐用キャスト回数について明確な数値は示せない。また転倒温度計・圧力計の必要性は利用者によって異なるため、何キャストできれば利用価値があるか一概には言えない。しかし少なくとも、数十回のキャストを連続して繰り返す観測に対しては、転倒温度計・圧力計の耐用性は十分とはいえない。

3.2 安定度

図1に転倒温度計・圧力計による計測値の、キャスト回数増加に伴う変化の一例を示す。横軸はキャスト回数、縦軸はCTDによる温度・圧力と、転倒温度計・圧力計による温度・圧力との差である。なおキャスト回数は等時間間隔ではないので、変化量と時間との関係を示すものではない。よって、公称の安定度とは単純に比較できない。

ほとんどの転倒圧力計は、キャスト回数の増加に伴い計測値の差が一定方向に変化する、ドリフト傾向が見受けられたが、それらの変化の割合や幅は1本ごとに異なっていた。より精度の高い計測値を得るためには、1本毎の履歴をとって計測値の変化を把握し、より信頼性の高い転倒温度計を使用したり、変化傾向や変化量が急変・増大したものは使用を差し控えるなどの選択を行うべきである。さらに、変化を定量化することで計測値に対する補正値が得られ、また検定期間の目安を掴むことも可能である。しかしそのためには、ある程度のキャスト回数を重ねることが必要であり、数十回程度のキャストで使用不能になるものについては検討の余地がない。

また転倒圧力計も、6,000dbar級・10,000dbar級のいずれも、キャスト回数の増加に伴うドリフト傾向が見受けられたが、その変化量は転倒温度計の公称精度に比べて小さかった。よって100キャスト程度の間では、転倒圧力計の計測値は概ね安定していたといえる。

3.3 精度

(1) 転倒温度計

図2に転倒温度計による計測値とCTDによる計測値の比較を示す。横軸はCTDによる水温、縦軸はCTDによる水温と転倒温度計による水温との差である。61本の転倒温度計から得られたサンプル数は2,587点であった。転倒温度計とCTDとの差は水温が高いほど、すなわち表層ほど散らばりが大きくなる。これは転倒温度計がCTDの水温センサーよりも約1 m上方に取り付けてあるため、温度勾配が大きい表層で取り付け位置の差に起因

する誤差が如実に現れたものと考えられる。またウインチ操作や採水のタイミングなどに十分注意を払い慎重な運用を行っているが、やはりRosette採水器は採水時にも多少の上下動をしている。この採水器の上下動による誤差も含まれているものと考えられる。

表3に転倒温度計の計測精度を公称精度と共に示す。精度検討の際、水温20deg-C以上、水温5～20deg-C及び水温5deg-C未満の3つの範囲に分類した。水温20deg-C以上の範囲では、表1に示したように転倒温度計そのものの分解能と精度が、水温20deg-C未満と異なるためである。また上述のとおり水温勾配の大きな表層では、転倒温度計とCTD水温センサーとの取り付け位置の差や採水器の上下動による誤差の影響が大きい。そこで、温度勾配が比較的小さくなる水深約1,000m以深で分離して解析することとし、便宜上水深約1,000 mを水温5deg-Cとした。

表3に示すとおり、全計測範囲における転倒温度計の水温差の絶対値の最大は1.459deg-C、平均は0.001deg-C、標準偏差は0.067deg-Cであった。また水温勾配が小さな水温5deg-C未満においては、水温差の絶対値の最大は0.586deg-C、平均は0.005deg-C、標準偏差は0.026deg-C

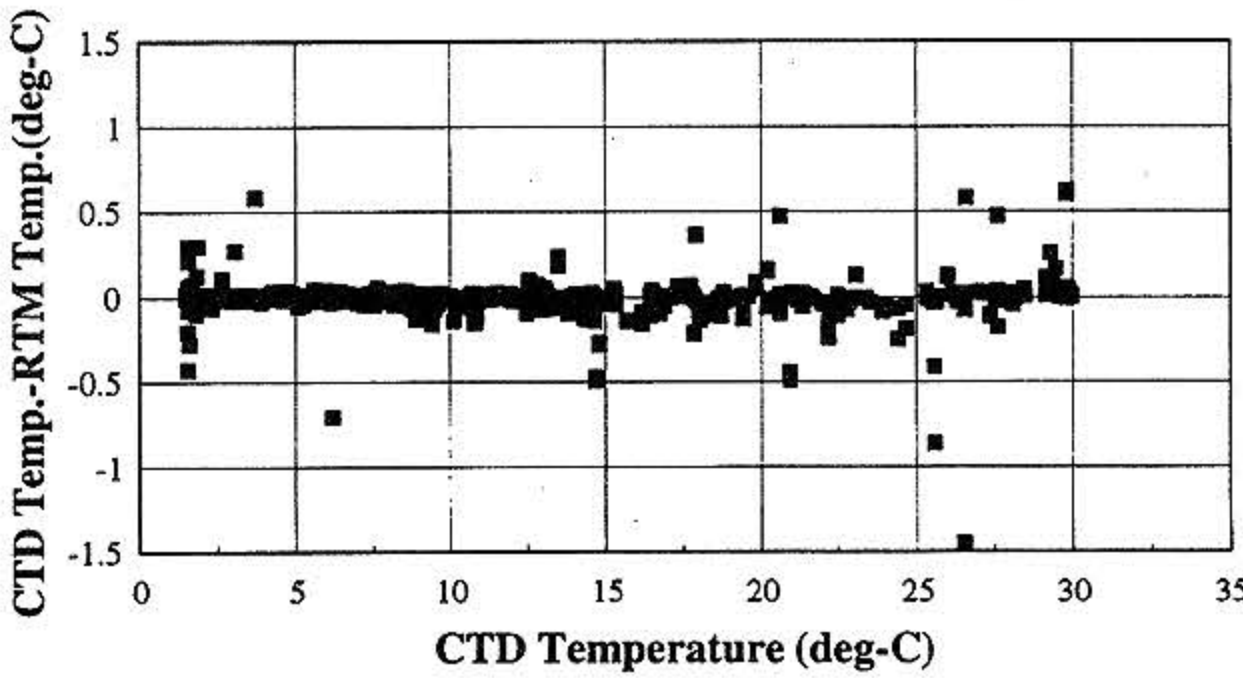


図2 転倒温度計とCTDとの水温差
Fig. 2 The difference between CTD and RTM in temperature.

表3 転倒温度計の計測精度
Table3 The accuracy of RTM.

	Range of measured temperature by CTD			
	All range	more then 20 deg-C	5 to 20 deg-C	less then 5 deg-C
Sample number	2,587 point	286 point	703 point	1,591 point
Maximum absolute value of difference	1.459 deg-C	1.459 deg-C	0.705 deg-C	0.586 deg-C
Average of difference	0.001 deg-C	0.002 deg-C	- 0.009 deg-C	0.005 deg-C
Standard deviation	0.067 deg-C	0.169 deg-C	0.055 deg-C	0.026 deg-C
Accuracy in specification		± 0.015 deg-C	± 0.01 deg-C	± 0.01 deg-C

であった。このように表層に比べ誤差が比較的小さくなる好条件下において慎重な運用を行った場合でも、実海域における転倒温度計の計測精度は公称精度の2～3倍程度で、観測条件や使用方法によってはさらに大きな誤差を生じることが考えられる。

但し安定度の項でも述べたように転倒温度計の特性は1本ごとに異なるので、1本毎の履歴をとって使用する転倒温度計を選択すれば、高い精度を得ることが期待できる。転倒温度計の使用に際しては、使用方法や精度の面で十分な注意を要する。

(2) 転倒圧力計

図3に6,000dbar級転倒圧力計による計測値とCTDによる計測値の比較を示す。横軸はCTDによる圧力、縦軸はCTDによる圧力と転倒圧力計による圧力との差である。8本の6,000dbar級転倒圧力計から得られたサンプル数は343点であった。転倒圧力計とCTDとの圧力差は、全て公称精度範囲に収まっており安定した結果を示した。

図4に10,000dbar級転倒圧力計による計測値とCTDによる計測値の比較を示す。横軸・縦軸は図3と同様で、23本の10,000dbar級転倒圧力計から得られたサンプル数は942点であった。転倒圧力計とCTDとの圧力差は概ね公称精度範囲内に収まっているが、圧力が高くなるほど圧力差の散らばりが大きくなる傾向が見受けられた。そこで図5に示すように、23本中の特定の9本のみプロットのマークを変えて識別させた。図5によると、図4で見受けられた圧力差の散らばりは、実は特定の転倒圧力計の計測値が圧力の増加に伴いある傾向を持ってCTDの計測値との差を広げていく事が判明した。このような傾向は、転倒圧力計の検定によって決定される、物理量に変換する際の係数を修正することで解決できる。

表4に転倒圧力計の計測精度を公称精度と共に示す。6,000dbar級転倒圧力計の圧力差の絶対値の最大は8.1dbar、平均は0.6dbar、標準偏差は2.6dbarであった。また10,000dbar級転倒圧力計の圧力差の絶対値の最大は47.2dbar、平均は-4.1dbar、標準偏差は6.2dbarであった。いずれも公称精度をほぼ満足しており、測定レンジに対応した使用法、すなわち深層での採水に対して採水間隔を50～100m程度開けた場合に、正しい水深で採水されたかどうかの1つの目安としては使用可能であると考えられる。

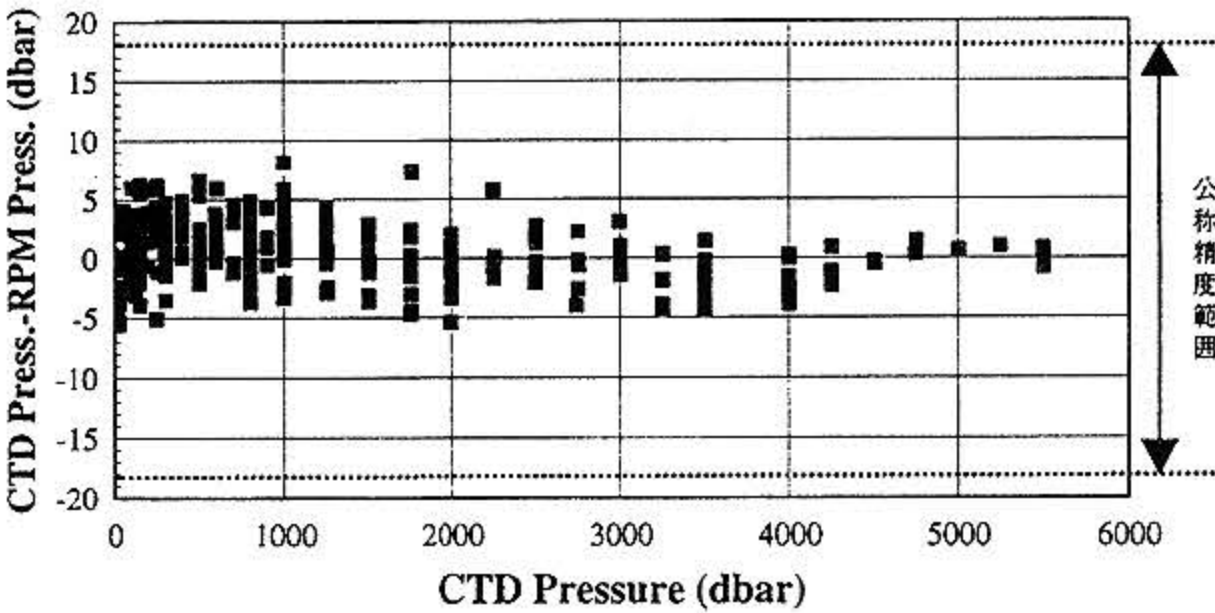


図3 6,000dbar級転倒圧力計とCTDとの圧力差
Fig. 3 The difference between CTD and 6,000 dbar rang type RPM in pressure.

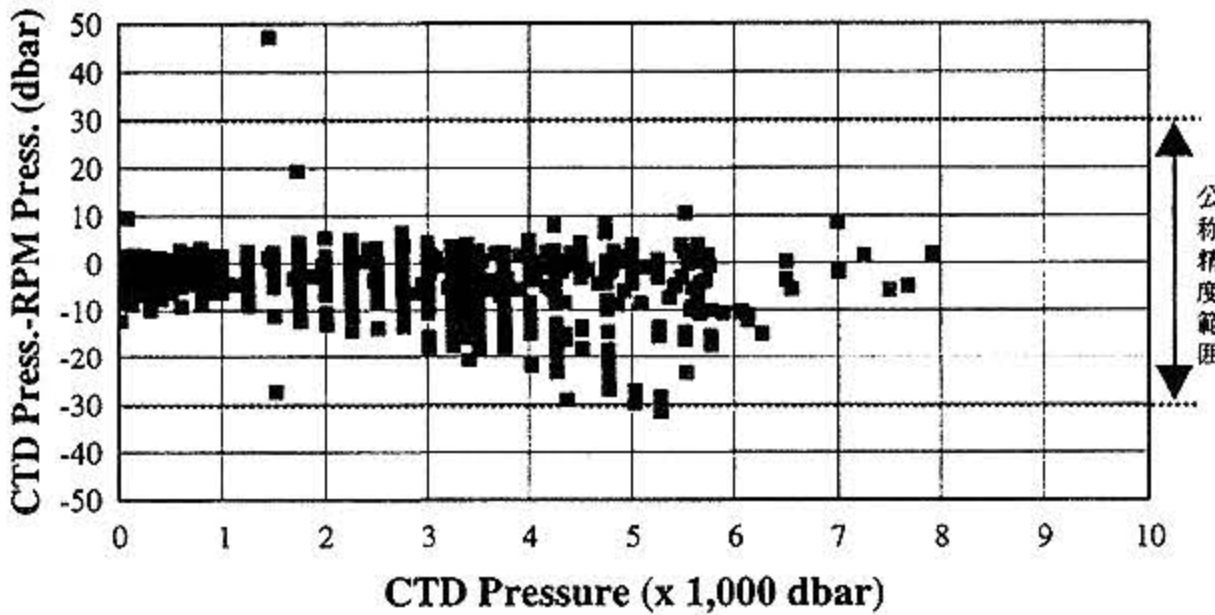


図4 10,000dbar級転倒圧力計とCTDとの圧力差
Fig. 4 The difference between CTD and 10,000 dbar rang type RPM in pressure.

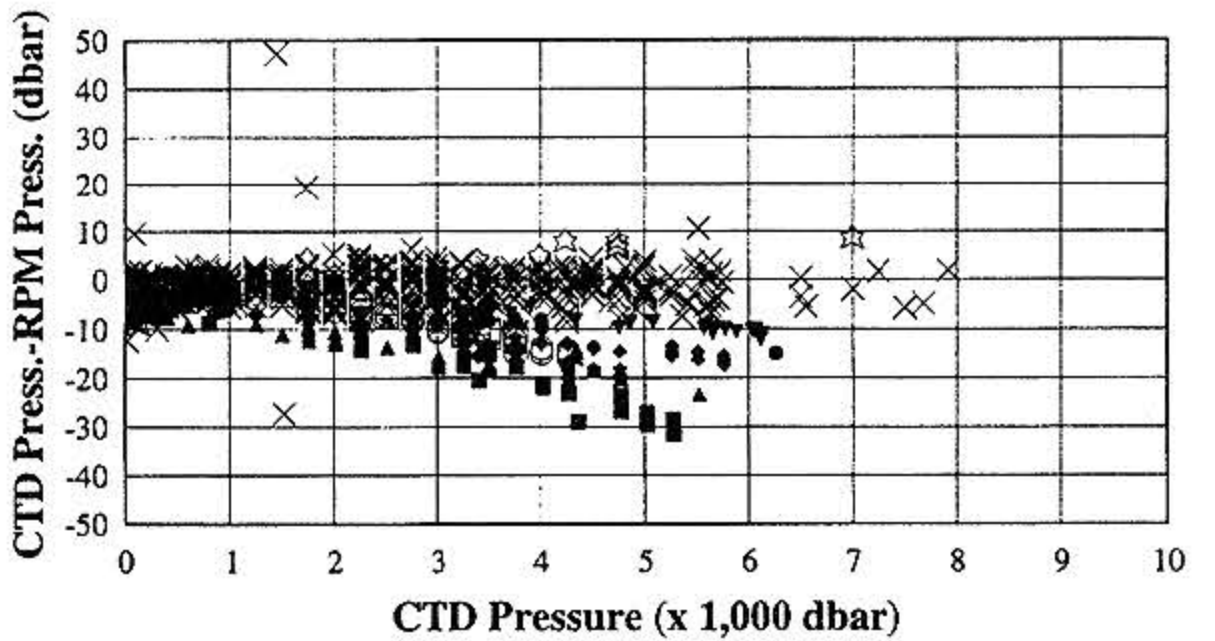


図5 特定の転倒圧力計についての深度と計測値の関係
×印以外は、特定の9本の圧力計による計測値を表しており、同じ圧力計による値は同じ印で示している
Fig. 5 The relation between pressure and measured value by RPM. Except of x-marks, each mark shows measured value by specific 9 RPMs.

表4 転倒圧力計の計測精度
Table4 The accuracy of RPM.

	6,000 dbar range type	10,000 dbar range type
Sample number	343 point	942 point
Maximum absolute value of difference	8.1 dbar	47.2 dbar
Average of difference	0.6 dbar	- 4.1 dbar
Standard deviation	2.6 dbar	6.2 dbar
Accuracy in specification	± 18 dbar	± 30 dbar

4 おわりに

デジタル転倒温度計・圧力計の基本特性について調査した結果、次の見地が得られた。

- ① 全体の3割弱のデジタル転倒温度計・圧力計は、50キャスト未満の間に異常が発生した。その主な原因は、計測値を表示する液晶画面の故障であった。
- ② 転倒温度計は、キャスト回数の増加に伴う計測値のドリフト傾向が見受けられた。それらの変化の割合や幅は1本ごとに異なっており、1本毎の履歴をとって計測値の変化を把握し、使用する転倒温度計の選択を行うことで、より精度の高い計測値を得る事が可能である。
- ③ 転倒圧力計も、キャスト回数の増加に伴う計測値のドリフト傾向が見受けられたが、その変化量は公称精度に比して有意とはいえず、安定度は概ね良好であった。
- ④ 転倒温度計の計測精度は、好条件下においても公称精度の2倍以上であった。観測条件や使用方法に対して十分に配慮した上で、計測精度へも注意を要する。
- ⑤ 転倒圧力計は公称精度をほぼ満足していたが、一部で検定により決定される物理量への変換係数を修正する必要性が認められた。深層で採水間隔を100m程度とすれば、正しく採水されたかの目安として使用可能である。

総じて転倒温度計・圧力計は非常にデリケートな測器であるため、その取り扱いや運用方法には十分な配慮を要する。また利用者は使用目的や要求精度から、その必要性を十分に検討した上で、転倒温度計・圧力計の導入を決定することが必要である。

謝 辞

本観測・研究にあたり多大なるご協力を頂いた、(株)マリンワークジャパンの山本博氏、並びにWOCE・TOCS

航海に関係された日本海洋事業(株)海技部、「かいよう」乗組員の皆様を始め、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本気象協会：転倒温度計. p21-33. In：海洋観測指針(気象庁編), 428pp. (1990)
- 2) 河野健・渡辺秀俊：インドネシア通過流の観測. p69-74. In：月刊海洋号外9「海洋大循環(2)－研究の進展－」, 海洋出版株式会社, 東京, (1995)
- 3) 柏野祐二・青山道夫・河野健・安藤健太郎・宗山敬・Syaefudin・Yudi Anantasena・渡辺秀俊：フィリピン南東方海域の亜表層・中層における水塊の分布について－1994年2月「かいよう」WOCE観測結果より－. 海洋科学技術センター試験研究報告, 32, 133-151. (1995)
- 4) Kashino, Y., M. Aoyama, T. Kawano, N. Hendiarit, Syaefudin, Y. Anantasena, K. Mneyama and H. watanabe: The water masses between Mindanao and New Guinea. J. Geophys. Res., 101(C5), 12, 391-12,400. (1996)
- 5) 柏野祐二・三寺史夫・青山道夫・河野健・渡辺秀俊・黒田芳史・安藤健太郎：パラオ～ミンダナオ間の水塊・流れについて. 海洋科学技術センター試験研究報告, 33, 77-92. (1996)
- 6) 柏野祐二・河野健：1996年6月のWOCE P8観測結果. 海洋科学技術センター試験研究報告, 35, 43-55. (1997)
- 7) 河野健・安藤健太郎・青山道夫：CTD圧力センサー検定について. 海洋科学技術センター試験研究報告, 32, 1-6. (1995)
- 8) 柏野祐二・青山道夫：WOCE観測におけるCTDデータ処理. 海洋科学技術センター試験研究報告, 35, 31-42. (1997)

(原稿受理：1998年6月10日)