

## CTD の圧力センサー検定について

河野 健\*<sup>1</sup> 安藤健太郎\*<sup>1</sup> 青山 道夫\*<sup>2</sup>

近年, CTD観測の高精度化が要求されており, 例えばWOCE (World Ocean Circulation Experiment) では, 圧力に関する正確度 3 dB, 繰り返し精度 1 dBの精度での観測を基準としている。この精度を満たすために, 航海の前後にデッドウェイトテスターによる検定を行った。その結果, 海洋観測研究部で使用しているCTDの圧力センサーの特性が明らかとなり, WOCEの基準を満足させることができた。

キーワード: CTD, 圧力センサー, 精度, 検定, 校正

## The Characteristics of the CTD Pressure Sensors

Takeshi KAWANO\*<sup>3</sup> Kentaro ANDO\*<sup>3</sup>

Michio AOYAMA\*<sup>4</sup>

The characteristics of the CTD pressure sensor used at Ocean Research Department were checked in order to satisfy the WHP onetime standards. As a result of a calibration by a dead weight pressure tester, it becomes clear that the characteristics of the 6,800 dB pressure sensor are ca. 0.4 dB in accuracy, 0.1 dB in precision and 0.2 dB in hysteresis. The characteristics of the 10,000 dB pressure sensor are ca. 0.8 dB in accuracy, 0.2 dB in precision and 0.1 dB in hysteresis.

Key words : CTD, pressure sensor, calibration

### 1 はじめに

近年, CTDの進歩とともに, 高精度観測が可能となってきている。たとえばWOCE (World Ocean Circulation Experiment) と呼ばれる国際共同研究では, 気候変動に及ぼす海洋の役割の解明を目的とし世界中の海洋において海面から海底直上までの高精度のCTD観測が要求されている。ここで言う精度には二種類あり, 一つは計測値と真値の差を表す正確度 (Accu-

racy), もう一つは計測値のばらつきを示す繰り返し精度 (Precision) である。WOCEで要求されている圧力の精度とは, 正確度 3 dB, 繰り返し精度 1 dB以内という厳しいものである (Requirements for WOCE Hydrographic Programme Data Reporting, 1993, Unpublished<sup>1)</sup>)。このような高精度の要求を満足させるためにはセンサーの検定・較正が必要である。また, Millard (1982)<sup>2)</sup>は2.5dBの圧力の誤差が塩分濃度0.001

\* 1 海洋観測研究部

\* 2 気象研究所(研究当時: 海洋観測研究部)

\* 3 Ocean Research Department

\* 4 Meteorological Research Institute

PSSの誤差を引き起こすことを示したが、これは特に変動が小さく0.001PSSのオーダーの塩分濃度の変化を問題とする深層循環の研究などには圧力の高精度観測が不可欠であることを示している。その他にも様々な種類のCTDを用いて様々な観測船等で得られたデータを一つのデータセットとして用いる際に問題となる均一性(Traceability)を確保する上でも検定・較正は不可欠なものとなってきている。

実際の検定の例としては、Millard (1982)<sup>2)</sup>がWoods Hole 海洋研究所で用いられているいくつかのNBIS製のCTDの圧力センサーの検定例を示し加圧時と減圧時では同じ圧力をかけていても計測値が異なるという履歴特性(Hysteresis)があることを示した。また長崎海洋気象台海洋課(1989)<sup>3)</sup>は、デッドウェイトテスターを用いた検定法について述べている。それは、Millard (1982)<sup>2)</sup>にならったものでCTD観測を想定して徐々に圧力をあげていきフルスケールに達したら徐々に減圧してこの間の誤差(かけた圧力と計測値の差)を記録するという方法で、増圧時と減圧時とに分けた誤差曲線を多項式近似して補正する方法である。また、C. Winn et al. (1993)<sup>4)</sup>はHawaii Ocean Time-series (HOT)観測で使用されたSBE製のCTDの圧力センサーのキャ

リブレーション結果として、1991年2月から6月の間に0.5dBのシフトがあり、1992年までの間のドリフトが線形であったと報告している。さらに、Millard et al. (1993)<sup>5)</sup>はチタン製のストレインゲージを装備したEG & G製のCTDの圧力センサーの検定結果として、計測値が優れた線形性(linearity)を示し且つ履歴特性も小さいということを示した。また、藤村ほか(1993)<sup>6)</sup>はFSI製のCTDの圧力センサーの特性を示し履歴特性がたかだか1dB程度であることを示した。

海洋観測研究部では、上述の検定法にならった圧力検定を航海の前後に行いCTDの圧力センサーの特性を把握することで圧力に関する高精度観測が可能となった。これは1993年度および1994年度のWOCE観測航海においてその厳しい要求精度を満たすことができたことで実証された(河野ほか(1993)<sup>7)</sup>:河野ほか(1994)<sup>8)</sup>)。本報では、まず第2章で圧力センサーの検定・較正法について、第3章において実際の観測に用いたCTDの圧力センサーの特性について述べる。

## 2 圧力センサーの検定法について

検定は主に、Burdenberg製のDead Weight Pressure Tester Model 480DAを用いて行った。この装置は

表1 圧力の計算式  
Table 1 Equation for pressure calculation

$$P = K * \frac{[\Sigma m + V * (\rho_f - \rho_a)] * g + c}{A_0 * [1 + a * P_n] * [1 + \lambda * (t - 20)]}$$

Variables		Constants	
P	Pressure (in units as marked on weights)	V	Fluid Head & Buoyancy Volume : -1.301 * 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> (low pressure range) -2.843 * 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> (high pressure range) (see note 5)
P <sub>n</sub>	Nominal Pressure (sum of pressures marked on piston & on weights applied to the piston).	C	Surface Tension force : 9.9 * 10 <sup>-4</sup> N (both ranges)
Σm	Sum of buoyancy corrected masses including piston mass kg (see note 4)	A <sub>0</sub>	Area of piston at zero pressure : 8.06425 * 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> (low pressure range) 8.06334 * 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> (high pressure range)
ρ <sub>f</sub>	Fluid density kg/m <sup>3</sup> (see note 6)	a	Pressure coefficient of piston : 11.4 * 10 <sup>-7</sup> /bar (low pressure range) 3.8 * 10 <sup>-7</sup> /bar (high pressure range)
ρ <sub>a</sub>	Air density kg/m <sup>3</sup> (estimated from air pressure (kPa) & temp. (°C) using the table in Appendix A)	λ	Temperature coefficient of piston : 23 * 10 <sup>-6</sup> /°C. (both ranges)
g	Local gravity m/s <sup>2</sup>	K	Pressure units conversion factor : 1 * 10 <sup>-5</sup> (bar)
t	Temperature of piston unit °C.		

(Burdenberg ; Operating and Maintenance Instructions, March 1993 より)

重りによって油圧をかける方式の試験器で、精度は主に油圧ピストンの面積の精度と重りの重量の精度による。この装置に付属の重りの重量は英国の国家基準と Traceability のある標準分銅によって校正されており装置全体の正確度は0.01%で、加圧の上限は7,000dBである。海洋観測研究部では、このほかに同社製の380D (6,500dBまで正確度0.03%) のものを比較用兼バックアップ用として使用している。

検定方法は、デッドウェイトテスターからCTDの圧力センサーが取り付けられている穴へパイプを接続し、油圧をかける方式である。デッドウェイトテスターのピストンの上に重りを乗せることで加圧してゆく。海洋観測研究部で主に1,000m以深までの海洋構造の鉛直分布を計測するために用いているCTD (SBE911plus) を検定する手順を以下に示す。

(1) CTDと船上局、船上局とデータ取得用コンピュータ、CTDの圧力センサーとデッドウェイトテ

スターからの油圧パイプの接続を行う。なお、CTDには温度センサーも取り付けられる。

(2) 0 dBの状態での計測を開始する。24Hzでデータをとる場合、通常3分間計測する。

その後、500dBに加圧して3分間計測し、再び0 mに戻して3分間計測する。

(3) いったん計測を終了して圧力と温度（この場合は気温）のデータをコンピュータのハードディスク上に書き込む。

(4) 再び0 dBの状態での計測を開始する。0 dBで3分間計測し500dBに加圧して3分間計測しさらに1,000dBに加圧して3分間計測する。その後500dBまで減圧し3分間計測さらに0 dBに戻して3分間計測する。

(5) 計測を終了しデータをハードディスクに書き込む。

(6) (4) の要領で500dB刻みで1,500dBまでの往復計測、2,000dBまでの往復計測というように順次6,500dBまで往復計測を行う。

(7) 得られたデータをVAXに転送し、それぞれの計測について0.1dB間隔で含まれる計測値の数を数える。例えば、499.75から499.84までの範囲の計測値の個数、499.85から499.94までの範囲の計測値の個数というように解析し、最も個数の多い範囲を計測値とする。この解

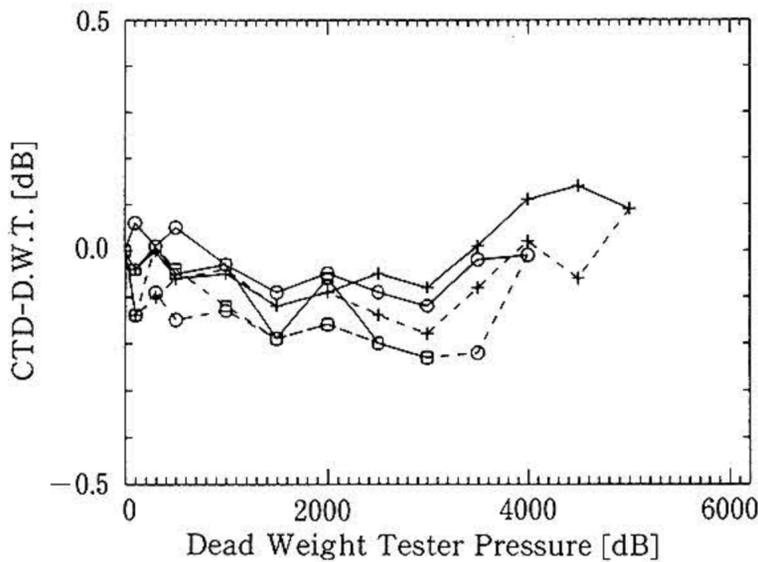


図1 圧力センサー (S51359) キャリブレーション結果  
Fig. 1 Pressure Sensor (S51359) calibration result

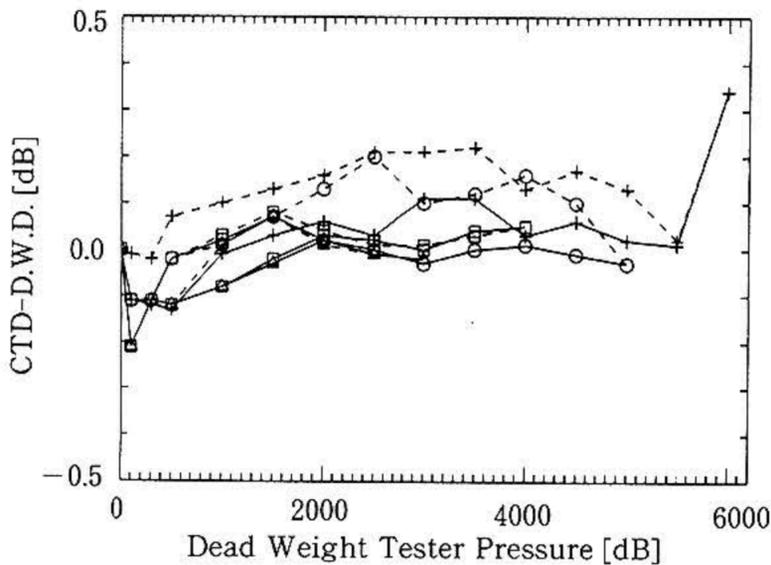


図2 圧力センサー (S41396) キャリブレーション結果  
Fig. 2 Pressure Sensor (S41396) calibration result

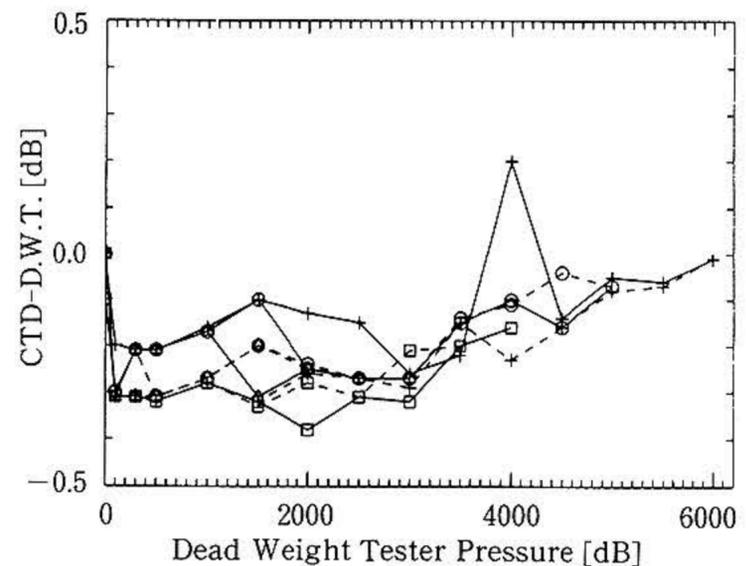


図3 圧力センサー (S43435) キャリブレーション結果  
Fig. 3 Pressure Sensor (S43435) calibration result

表2 6,800m仕様の圧力センサーの特性  
Table 2 Characteristics of 6,800 dB pressure sensor  
unit : dbar

Ser. No. of sensor	Accuracy	Precision	Hysteresis
S51397	0.4	0.1	0.2
S41396	0.3	0.1	0.2
S43435	0.3	0.1	0.2

析を、各計測の加圧時と減圧時に行いその結果得られる計測値と実際にかけた圧力の差を誤差とする。

デットウェイトテスターのマニュアルによると、実際にかけた圧力Pは表1のような式であたえられる。ここで注意すべき点は、式中に空気の密度 $\rho_a$ が含まれていることでこれは検定中に室温を計測し、かつ変化を小さくする必要があることを意味する。また、式中には Local Gravity  $g$  がふくまれており、検定を行う場所の重力加速度を知っておく必要もある。

この手順で、航海の前後に検定を行い誤差がその航海の観測で要求される精度に満たない場合には、何等かの補正を行う必要がある。なお、第3章以下の検定のデータは、480DAを用いて海洋科学技術センターにおいて計測したものが主であるが、気象庁所有の380DA

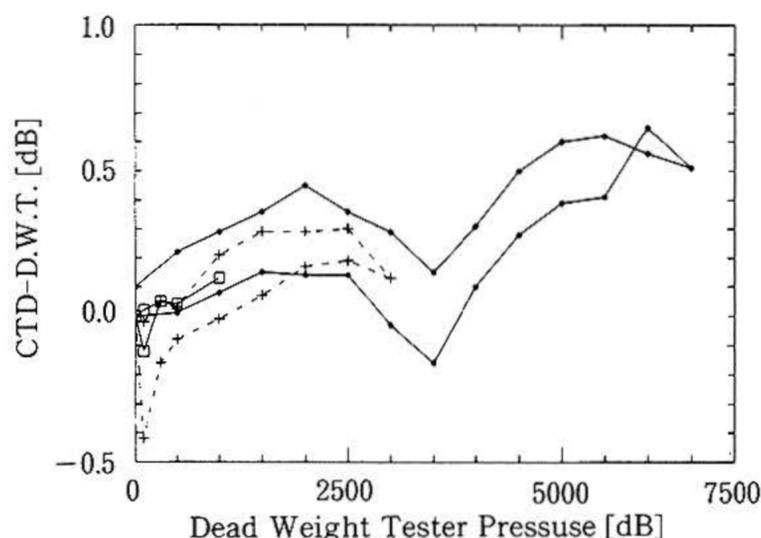


図5 圧力センサー (10,000 m仕様) キャリブレーション結果

Fig. 5 Pressure Sensor (for 10,000dB) calibration result

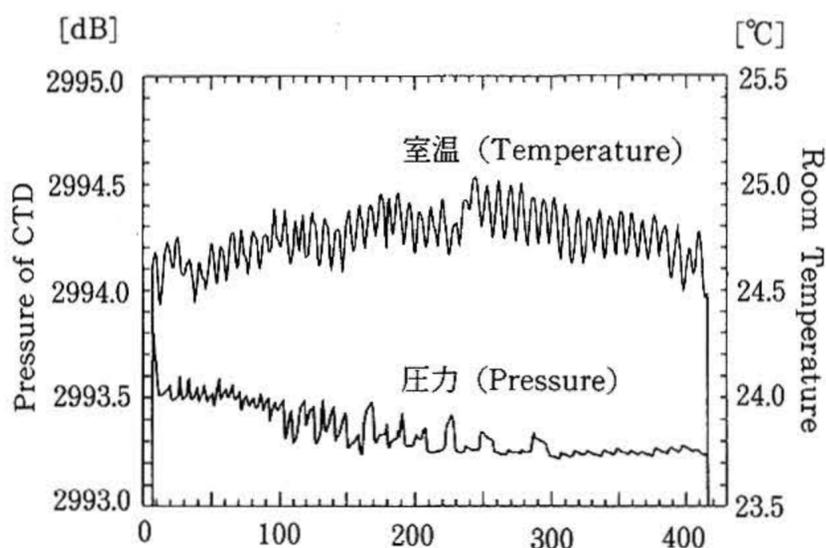


図4 圧力センサー (S43435) の安定度  
Fig. 4 Stability of Pressure Sensor (S43435)

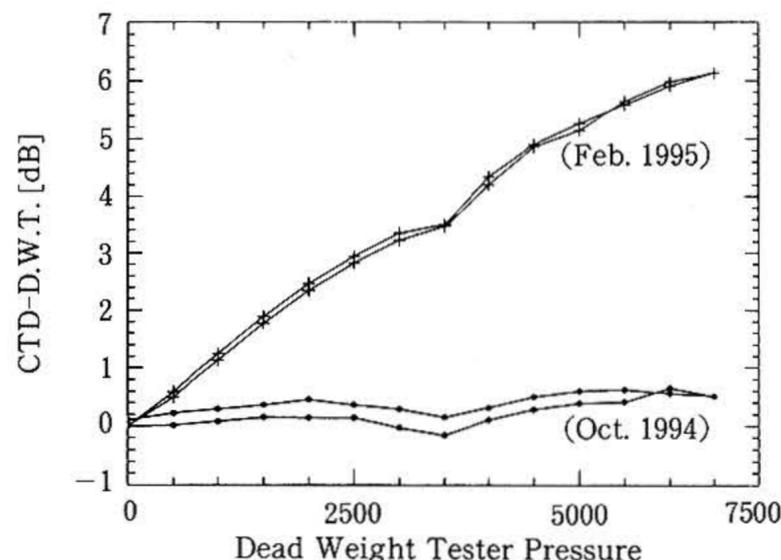


図6 センサー特性 (傾き) の変化  
Fig. 6 Change of slope

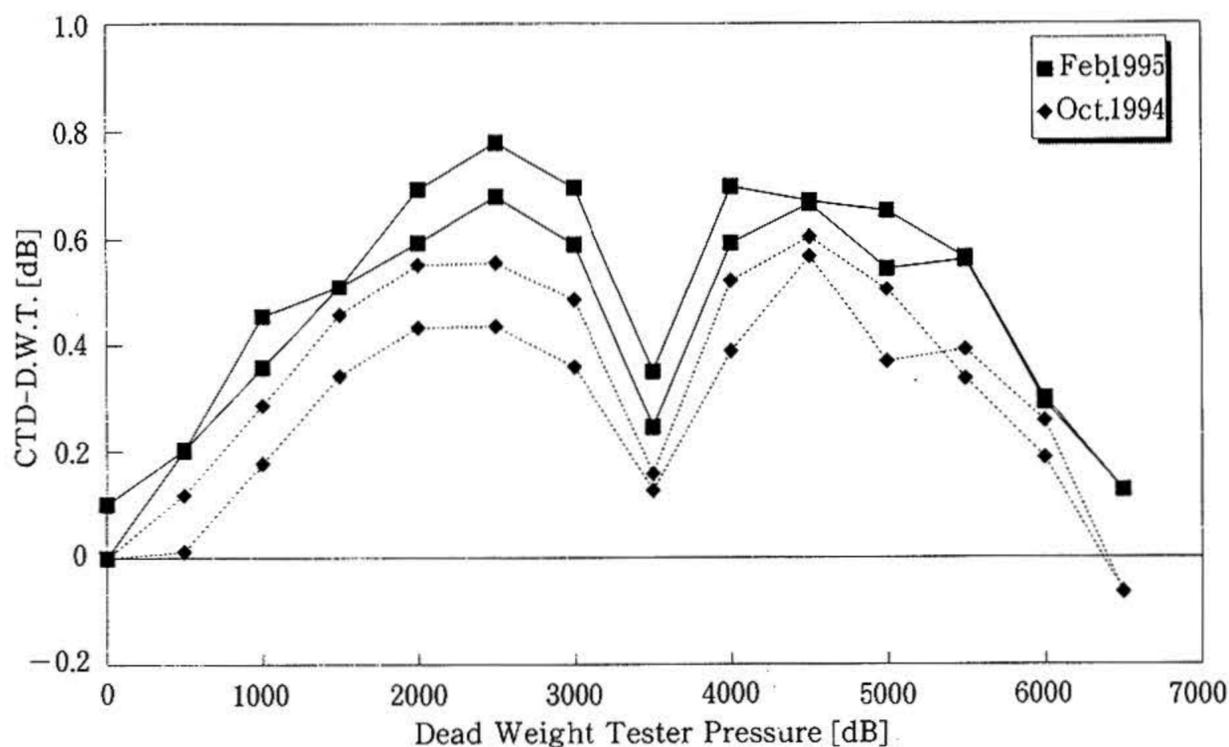


図7 補正後の圧力センサーの特性曲線  
Fig. 7 The residual pressure of the dead weight tester pressure minus corrected CTD pressure

(6,500dBまで正確度0.01%)を用いて気象庁で行った結果と海洋観測研究部所有の380Dと気象庁所有の380DA用の重りのセットを組み合わせて海洋科学技術センターにおいて計測したものが含まれている。いずれの場合も室温はCTDにとりつけた温度センサーを用いて計測し、また重力加速度は気象庁で行った場合は実測値の $9.79776\text{m/s}^2$ を、海洋科学技術センターで行った場合は近隣の基準点3点から内挿した値の $9.79756\text{m/s}^2$ を使った。

### 3 圧力センサーの特性について

第2章で述べた方法で、海洋観測研究部で使用しているSBE製のCTDに取り付けられているParoscientific製のdigiquartz圧力センサーを検定した。検定した圧力センサーは耐圧6,800m仕様が3個、耐圧10,000m仕様が1個である。センサーのキャリブレーション係数は購入当時の係数をそのまま使用している。

#### (1) 耐圧6,800m仕様の圧力センサーについて

図1から図3に検定結果のグラフを示す。横軸はデッドウェイトテスターによって実際にセンサーにかけた圧力、縦軸はCTDが示す圧力(計測値)と実際にかけた圧力の差(誤差, Accuracy)を示す。実線が加圧時、点線が減圧時である。この加圧時の誤差と減圧時の誤差の差を履歴特性(Hysteresis)と言う。また同じ圧力を何度か測ったことになるが、そのばらつきが繰り返し精度(Precision)となる。例えば図3では、最大で約 $-0.3\text{dB}$ の誤差があり、ばらつき具合の幅は最大で約 $0.2\text{dB}$ (Precisionは約 $0.1\text{dB}$ ) Hysteresisは $4,000\text{dB}$ のデータを除くと概ね $0.2\text{dB}$ である。この3個の圧力センサーの特性をまとめたものが表2である。Winn et al. (1993)<sup>4)</sup>によると、ハワイ大学で行った同種のセンサーの検定でもHysteresisは約 $0.05\text{dB}$ から $0.25\text{dB}$ であったと報告されており、本報における結果とほぼ一致している。藤村ほか(1993)<sup>6)</sup>は、FSI製のCTDの圧力センサーのHysteresisは高々 $1\text{dB}$ 程度と報告しており、SBE製のCTDのほうが若干履歴特性が優れているようである。また、シリアルナンバーが43435のセンサーについては、約400分の安定度の試験を行った。その結果が図4である。計測値は徐々に低くなってはいるがその差は約 $0.4\text{dB}$ 程度であり、また室温が安定した150分以降では大変良い安定度を示している。

#### (2) 耐圧10,000m仕様の圧力センサーについて

耐圧10,000m仕様の圧力センサー(S41223)は、1994年2月~3月のWOCE航海および1995年1月のWOCE

航海に使用したセンサーであり、検定は1994年3月と1994年10月、1995年2月に行った。1994年3月の検定結果を図5に示す。正確度が最も悪いところで、 $0.6\text{dB}$ 程度、繰り返し精度は約 $0.3\text{dB}$ 程度、Hysteresisは最大 $0.4\text{dB}$ 程度であることがわかる。これは、特に何の補正をしなくてもWOCEの要求精度を満たすことができることを意味している。ところが、1994年10月に行った試験では様相が異なっていた。図6は1994年3月の検定結果と1994年10月の検定結果を同時にプロットしたものである。ただし、図5とは縦軸のスケールが異なっている。これは1994年3月から1994年10月までの間に何等かの理由でセンサーの特性が大きく変わったことを意味している。この場合、このままでは誤差が最大 $6\text{dB}$ 程度となってしまうWOCEの精度を満たすことができない。そこで、1次回帰を行い、補正を行った。補正後の結果を1995年2月の検定結果とともに図7に示す。補正後は最も誤差の大きいところで $0.8\text{dB}$ 程度 Hysteresisは約 $0.1\text{dB}$ 程度となっていることがわかる。また1994年10月と1995年2月の間のずれは約 $0.2\text{dB}$ 程度あるが、これを繰り返し精度として解釈すると繰り返し精度は約 $0.2\text{dB}$ 程度となる。

### 4 おわりに

CTD観測の高精度化のための第1歩として圧力センサーの検定・較正を行った。その結果、圧力に関してはWOCEの要求基準を満足させるような高精度観測が行えるようになった。検定・較正によって海洋観測研究部で使用しているCTDの圧力センサーの特性が明らかとなったが、10,000m仕様のセンサーについては、1994年3月から10月の間にセンサー特性の著しい変化がみられた。この原因については今のところ不明である。

### 謝辞

本研究にあたり、デッドウェイトテスターを使用させてくださった気象庁海洋課の金子郁夫博士に感謝いたします。また、SBE911plusのデモ機を使わせて下さった株式会社EMSの桑原氏にも感謝の意を表します。さらに、計測に協力して頂いた株式会社日本海洋事業の林美鶴氏並びに藤崎正行氏に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) Requirements for WOCE Hydrographic Programme Data Reporting, edited by T. Joyse and Charles Corry, WOCE Hydrographic Programme

- Office, (1993). Unpublished.
- 2) Millard, R. : CTD calibration and data processing techniques at WHOI using the 1978 practical salinity scale. Proceeding from International STD conference and workshop, Marine Technology Society, San Diego Section and MTS Oceanic Instrumentation Comittee, (1982).
  - 3) 長崎海洋気象台海洋課：新長風丸のCTDシステムについて, 測候時報, 56 (3), 91-114. (1989).
  - 4) Winn, C., R. Lukas, D. Karl and E. Firing : "Hawaii Ocean Time-series Data Report 3 1991". University of Hawaii, p 7. (1993).
  - 5) Millard, R., G. Bond and J. Toole : Implementation of a titanium strain gauge pressure transducer for CTD applications. Deep-Sea Research 40 (5), 1009-1021. (1993).
  - 6) 藤村昌彦・高槻 靖・中野俊也・山田 卓 : F社製TRITON-ICTDの性能評価. 1993年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 292-293. (1993).
  - 7) 河野 健・安藤健太郎・青山道夫 : Sea-Bi CTD SBE9/11の圧力センサーの特性について. 1993年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 29 (1993).
  - 8) 河野 健・安藤健太郎・柏野祐二・青山道夫・山 敬・渡辺秀俊・Syaefudin・Yudi Anasena : SBE911plusのキャリブレーションについて (1994年2月「かいよう」WOCEクルーズデータより). 1994年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 65-66. (1994).

(原稿受理 : 1995年 2月13日)