

「しんかい2000」用環境計測装置の開発

松本文彬*¹ 萩原廣治*¹ 中西俊之*¹
安藤久司*¹ 鈴木博親*² 鈴木重教*²

「しんかい2000」は当初から所要の調査観測機器を装備しているが、当センターでは、各分野に共通するニーズ 高い調査観測機器を開発している。その一つとして深海生物等の調査観察を行う際にユーザーのニーズが強かった、海中環境（深度、溶存酸素、PH、水中音速）を自動的に計測、表示、記録できる環境計測装置をほぼ開発したので報告する。

Development of an Ocean Profiling Instrument (PH, Dissolved Oxygen, Sound Velocity, and Depth) for "SHINKAI 2000"

Fumiaki Matsumoto*³ Hiroharu Hagihara*³ Toshiyuki Nakanishi*³
Hisashi Ando*³ Hirochika Suzuki*⁴ Shigenori Suzuki*⁴

The deep-sea submersible research vehicle "SHINKAI 2000" was equipped with instruments for research and observation when built in 1981.

JAMSTEC has since developed other research and observation instruments meeting major needs common to researchers in several fields.

As one such project, we have developed an ocean profiling instrument to assist research on deep-sea life, etc. The device measures, displays and automatically records several parameters of the ocean environment: pH, dissolved oxygen, sound velocity, and depth to 2000 m.

*¹ 深海開発技術部

*² 株式会社鶴見精機

*³ Deep Sea Technology Department

*⁴ THE TSURUMI-SEIKI CO., LTD.

1. はじめに

「しんかい2000」は当初から必要な調査観測器を装備しているが、センターでは更に新しい機器の開発を目指して研究を続けている。当センターでは、海洋開発推進懇談会深海調査研究検討会の深海調査研究に関する報告書（昭和56年7月2日付）に示された研究課題、及び潜水調査船開発研究会調査観測機器専門部会（部会長：小林和男東京大学教授）における「しんかい2000」の研究課題に対応する調査手法と、それに必要な観測機器について検討し、開発を推進している。この中の一つが、この環境計測装置である。

環境計測装置は溶存酸素、PH、水中音速、深度を計測、記録する装置である。

この装置は陸上試験、実海域試験等を経て、概ね深度2000mで使用できることを確認しており、かつ、記録データのアウトプット、グラフ化のプログラムも完成したので、以下その開発概要を報告する。

2. 装置の開発目標設定

(1) 構成

センサ部はPH、溶存酸素、深度、水中音速の各センサで構成し一体型として、潜航深度圧を受ける「しんかい2000」の船外に装備できるものとする。記録部は信号処理部、表示部、記録部で構成し一体型として、「しんかい2000」の船内に装備できるものとする。（図1参照。）

センサ部と記録部の間は「しんかい2000」の予備配線を使用する。記録データは母船「なつしま」のオーシャン・データ・アナライザでタイプアウト及びグラフ表示が行えるものとする。

(2) 使用条件

表1の条件で使用できるものとする。

(3) 性能

表2の性能を有するものとする。

3. 装置の開発

本装置を開発するに当たって、以下の点に留意した。

- ① 小型、軽量
- ② 低消費電力
- ③ 高信頼性、高精度

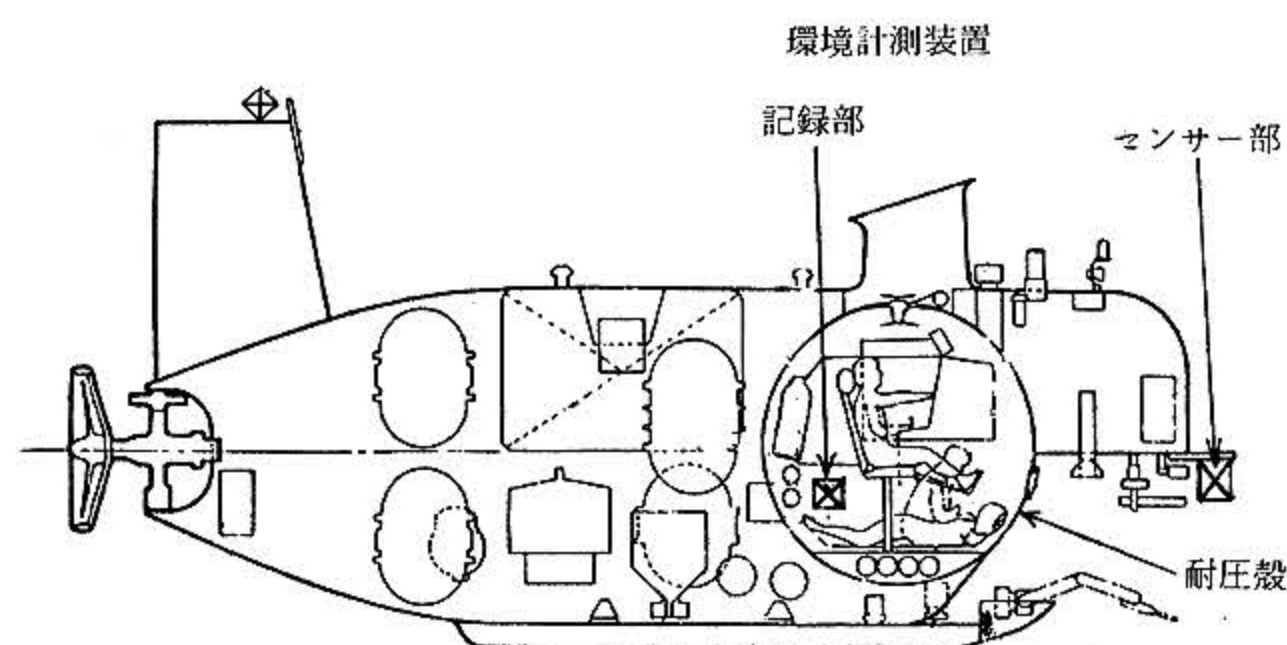


図1 環境計測装置の装備位置

Locations of the ocean profiling instrument

表1 環境計測装置の使用条件

Environmental conditions of the ocean profiling instrument

項 目	使 用 条 件			
	圧 力	温 度	湿 度	そ の 他
大 気	大 気 圧	-10~50℃	最大90% RH	
耐圧殻内(船内)	kgf/cm ² -0.1~0.75	同 上	同 上	
海 水	kgf/cm ² 0~207	0~32℃	-	耐圧試験圧力 311 kgf/cm ² G
動 揺	最大± 22.5°			
傾 斜	最大± 15°			

表2 環境計測装置の目標性能

Planned performance of the ocean profiling instrument

項 目		目 標 性 能		
		計 測 範 囲	計 測 精 度	そ の 他
セ ン サ 部	PH	6 ～ 9 PH	± 0.05 PH	温度補償付
	溶存酸素	0 ～15PPM	± 0.16PPM at 0～5PPM ± 3 % at 5～15PPM	
	水中音速	1400～1600m/s	± 0.16 m/s	
	深 度	0 ～2000m	± 3 m	
記 録 部	表 示	・ディジタル表示 ・表示桁数；（PH）3，（溶存酸素）4，（音速）6		
	記 録	・サンプリング周期；6秒 ・マグネットカセット式 ・記録時間；8時間以上		

④ 各測定センサーの一体化

⑤ 取扱い容易

(1) センサー

① 深度計

深度計センサは簡単な構造で、精度が高く、実績も多いストレインゲージ方式とする。

0～2000m深度の圧力を直流電圧信号に変換し、増幅器でDC 0～5 Vとする。

② 音速計

海水中の音速は水温、水圧、塩分で変化する。計測原理は、一般的なシング・アラウンド方式とする。

送信用振動子から発信された音波は海水中を伝搬し、反射板で反射し、受信用振動子で受信される。(図2参照。)

音速の径路長は構造的に一定であるから、音速はシング・アラウンド周波数に比例する。この方法だと海水の流れの影響は送信路と受信路で相殺され、無関係に計測できる。

また、送受信用振動子板は電気音響変換素子でジルコン酸チタン酸鉛磁気とする。

なお、音速計の周波数信号はバッファを経て出力され、信号処理部で次式の変換をする。

$$V_s = F \cdot K$$

V_s : 音速 (m/s)

F : シング・アラウンド周波数

K : 定数 (0.206425)

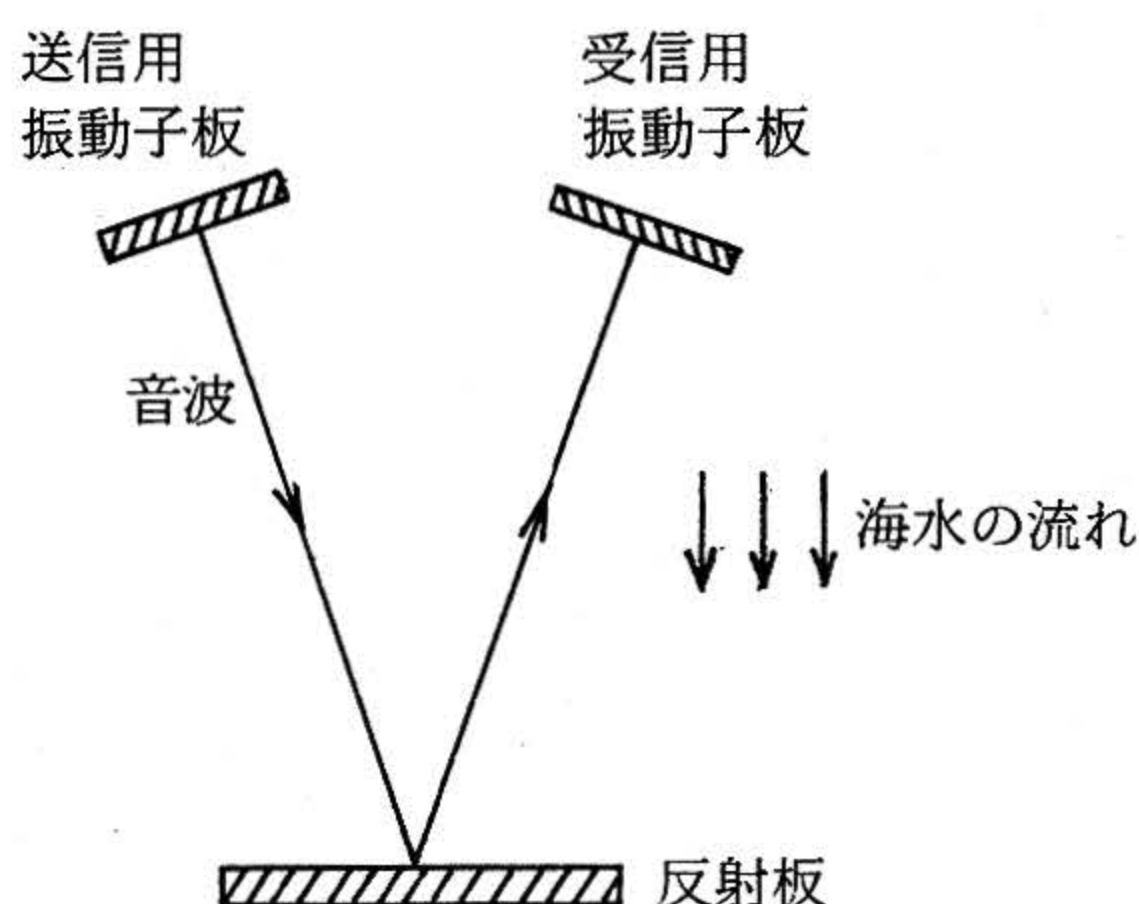
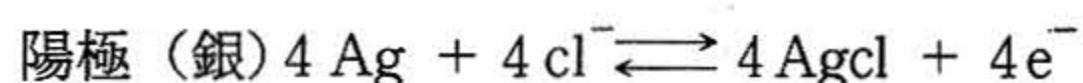
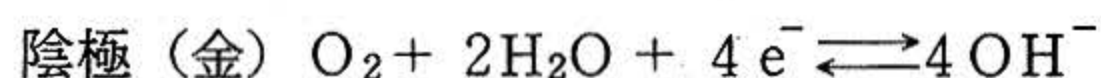


図2 音速計センサー部
Sound velocity sensor

③ 溶存酸素計

センサは、深々度の溶存酸素計測用として一般的な隔膜ポーラログラフ方式とする。センサ部の構造は図3に示す。両極に0.8 Vの電圧をかけておき、テフロン隔膜を透過してくる海水中の溶存酸素は電解液 (KCl) 中で次の反応をし、溶存酸素の還元電流が起こる。この還元電流をオペレーショナル・アンプリファイアで電圧に変換し、0～15 PPM の溶存酸素がDC 0～5 Vに対応する。



なお、海水温度による還元電流の変動が大きいので、サーミスタを用いた温度補償回路を組み込んで補正する。

④ PH計

ガラス管の一端をふくらませた球の内外で2種の水溶液を接するようになると、ガラス膜を介して電位差が出現する。その電位差は両液のPHの差に比例することがCremerによって見いだされた。この原理によるPH計はガラス電極方式と呼ばれるが、深度100 m未満のものしかないので、2000 mで使用できるものを開発する。センサ部の構造を図4に示す。

高圧用にするため、ガラス電極は保持部を強化し、比較電極の外筒は特殊のプラスチックとし、かつ、圧力バランスゴムで外圧均圧構造とする。

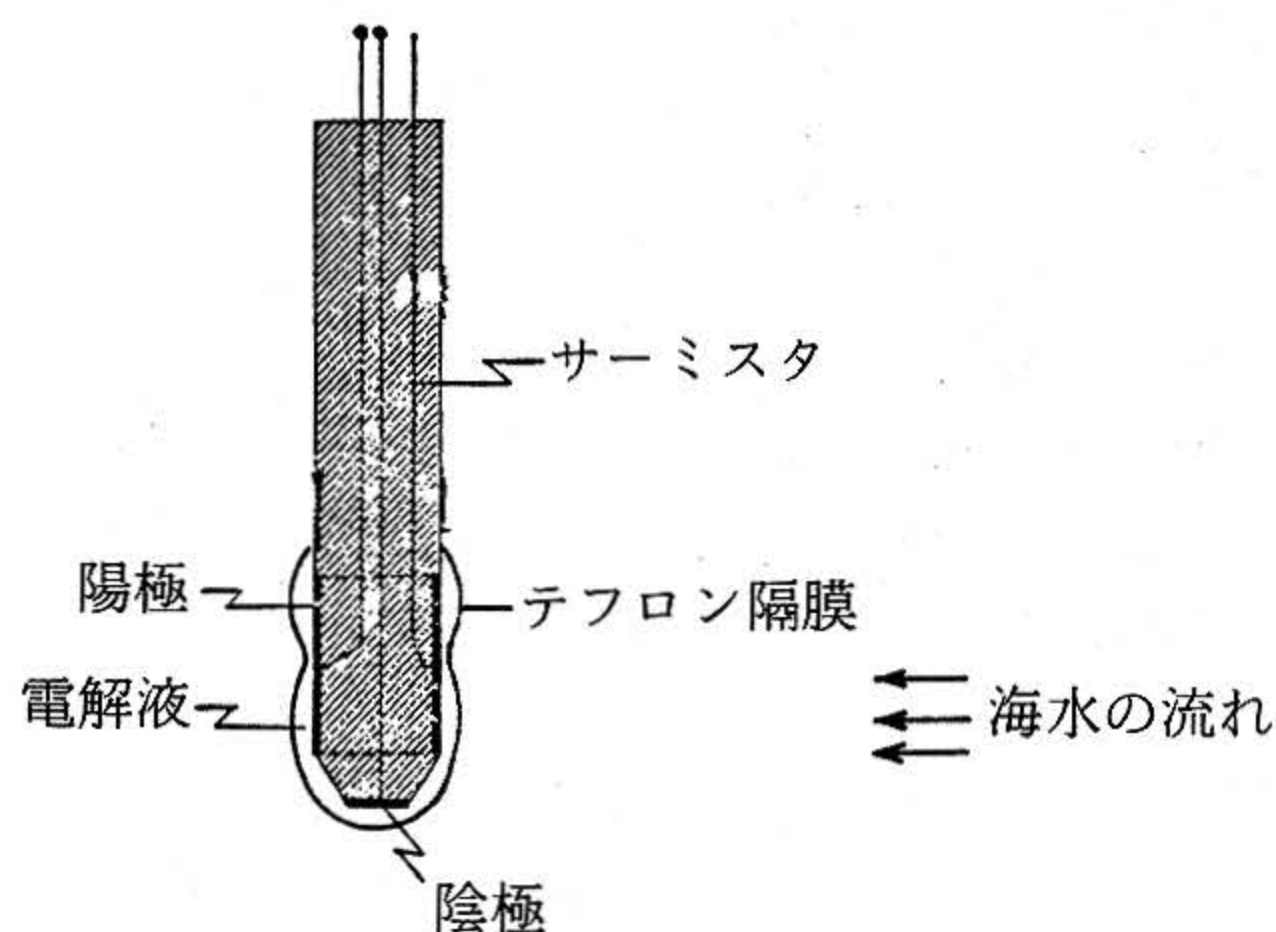


図3 溶存酸素計センサー部
Dissolved oxygen sensor

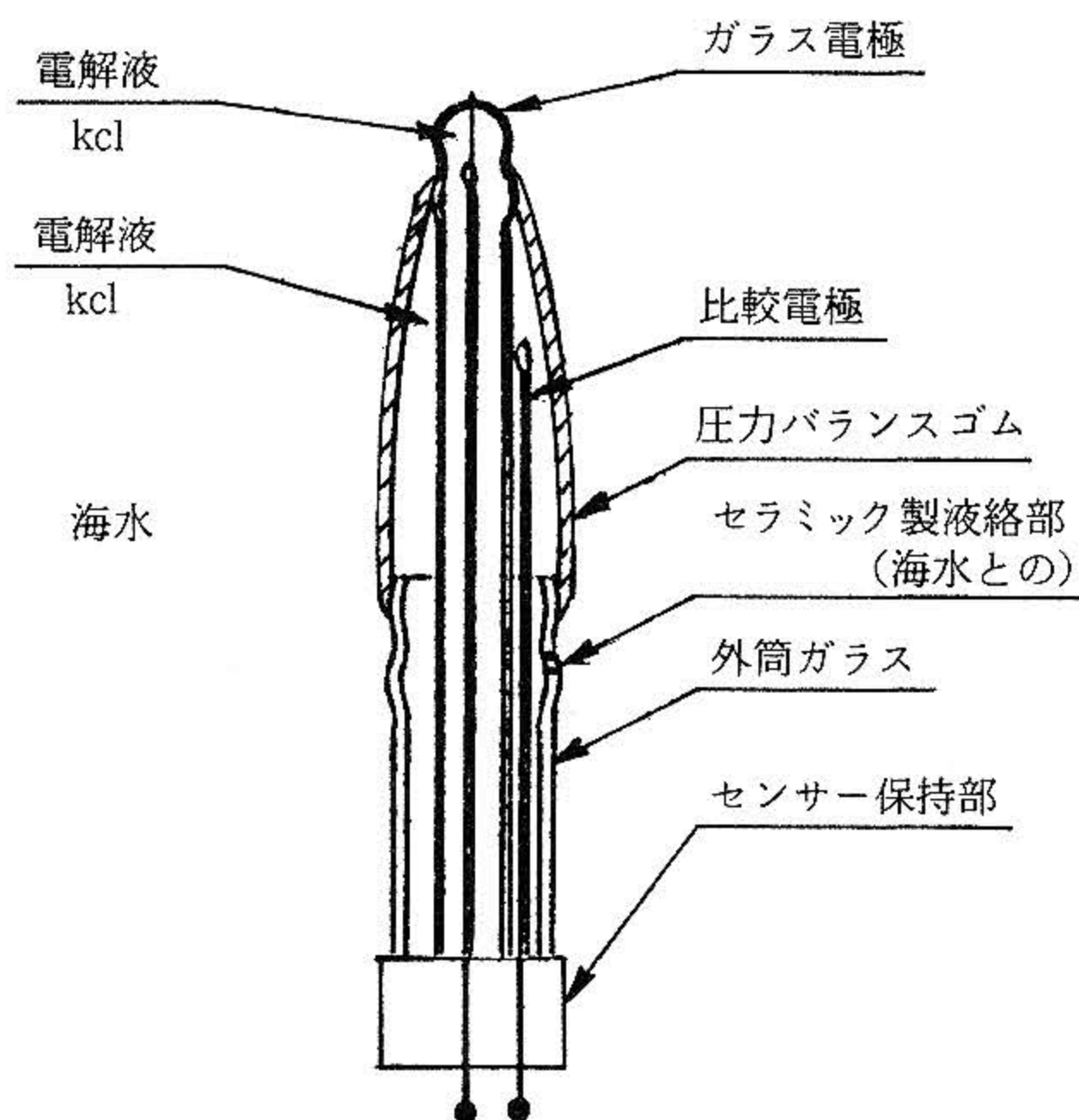


図4 PH計センサー部
PH sensor

ガラス電極の内部抵抗は常温で数十M Ω あるので、電位差を検出するため、数千M Ω 以上の入力インピーダンスをもったプリアンプを使い、インピーダンス変換して、白金抵抗体で温度補償をし、絶縁型増幅器を経て、PH 6～9をDC 0～5 Vに対応させる。

(2) 装置の製作

深度2000mの高圧にさらされ、かつ、高性能が要求されることから、細心の注意を払って製作した。完成品を写真1に示す。センサ部のブロック図を図5、信号処理記録部のブロック図を図6に示す。また、センサ部外形図を図7、信号処理記録部外形図を図8に示す。

以下、信号処理記録部について概要を説明する。

① 電源部

直流電源28V (1.5 A) をDC/DC コンバータで ± 15 V (アナログ回路用), 5 V (デジタル回路用) をつくり、回路部及びセンサに供給している。

② タイマ部

月、日、時、分のカウンタ内蔵のタイマ部で表示すると共に、カセット・データ・レコーダにデータを記録する。

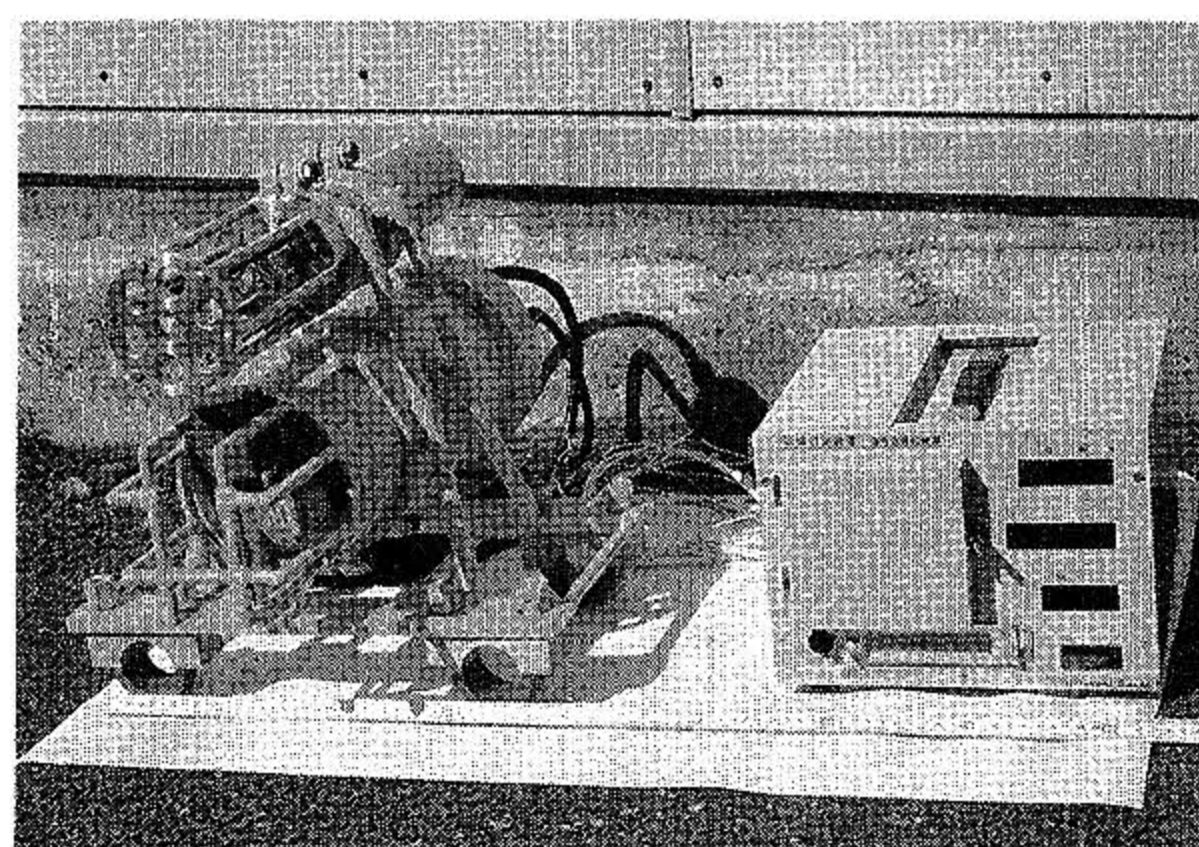


写真1 完成した環境計測装置
(左；センサー部, 右；記録部)
Completed ocean profiling instrument
(sensor unit on the left, recorder unit on the right)

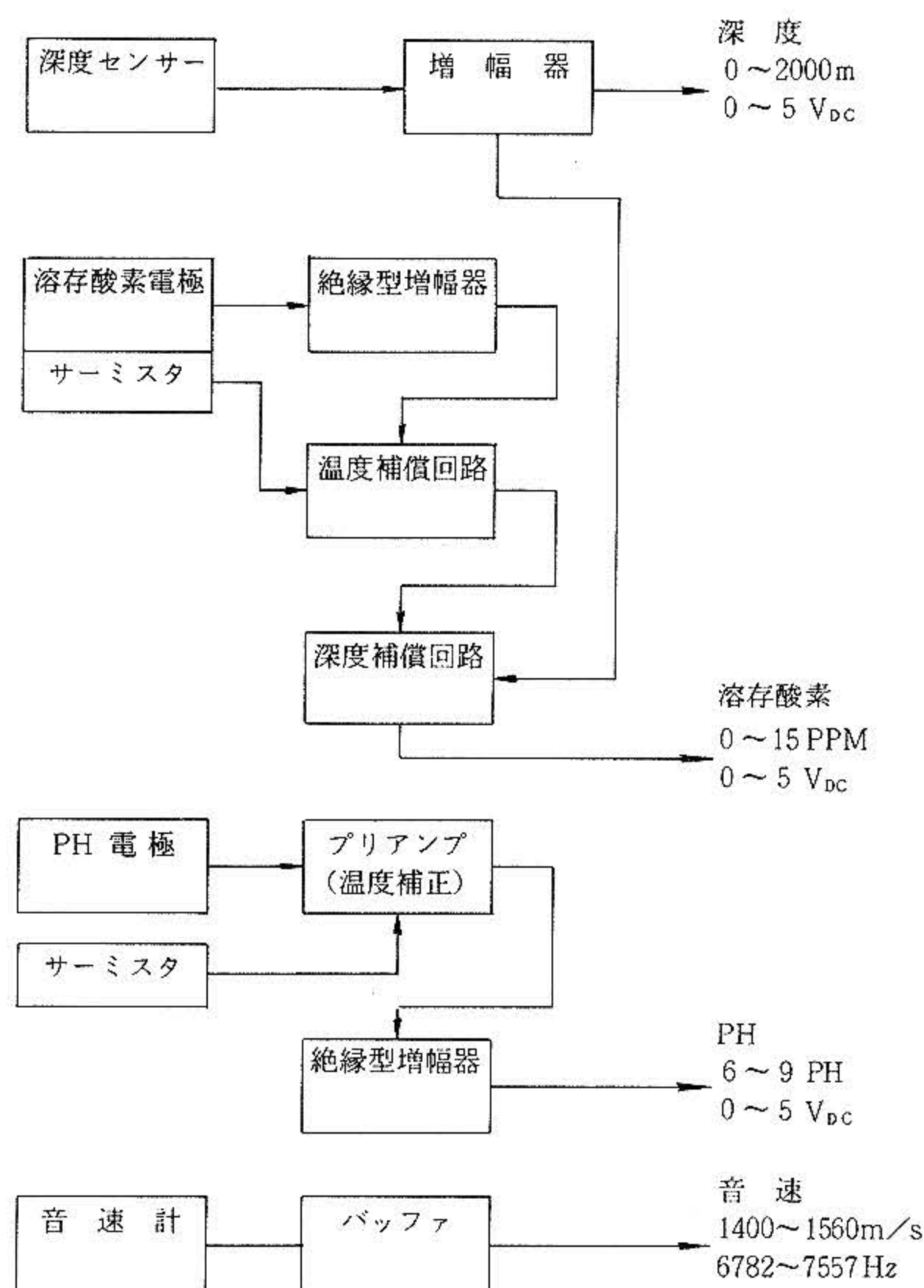


図5 センサブロック図
Block diagram of sensor

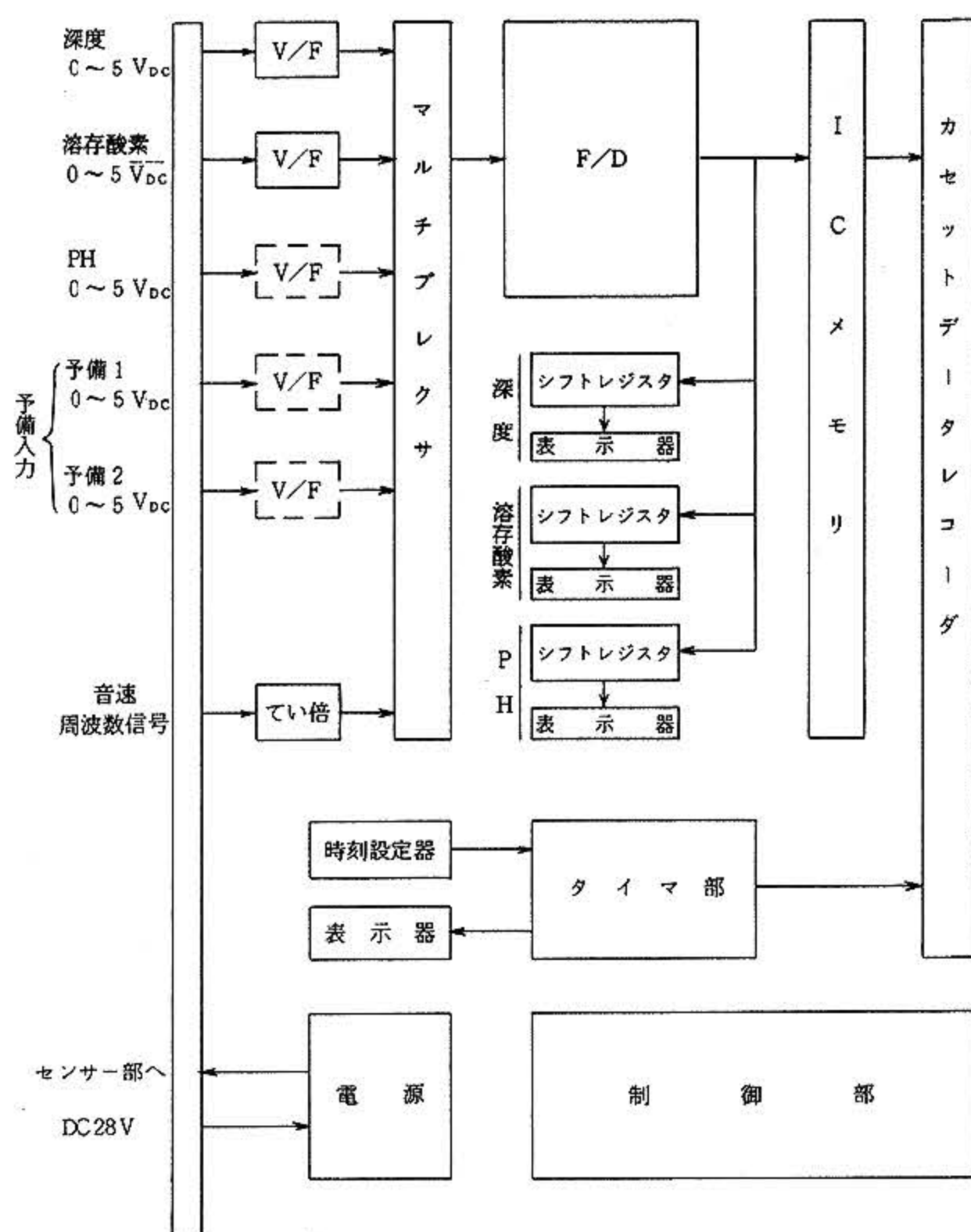


図6 信号処理記録部ブロック図
Block diagram of data processing and recording system

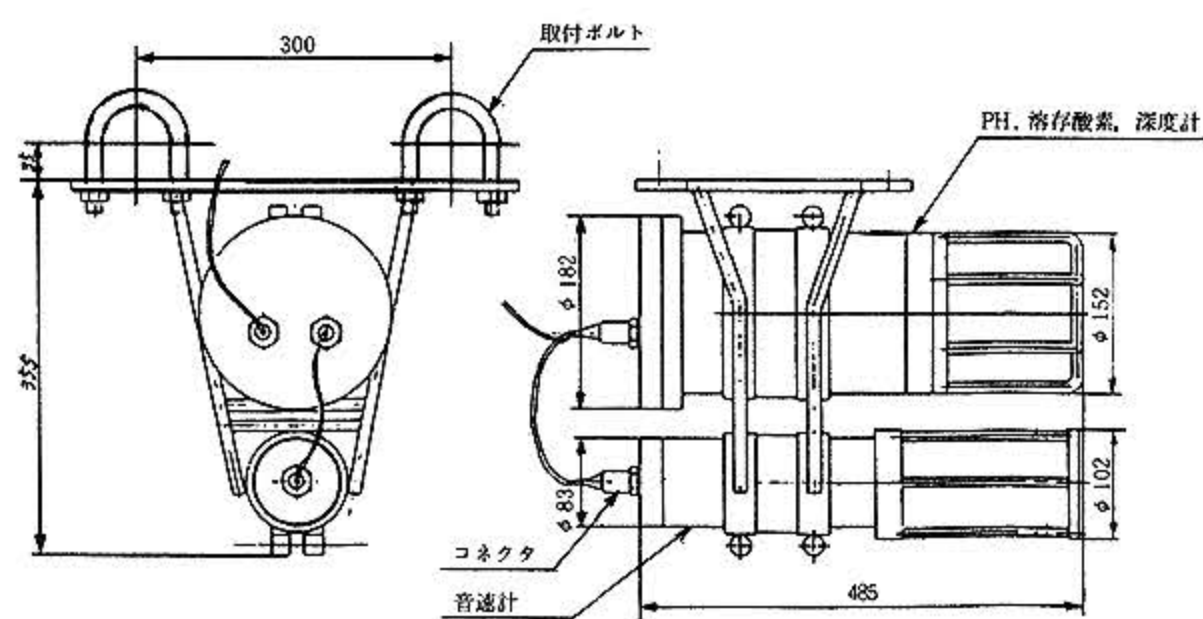


図7 環境計測装置センサー部外形図
Size schematic of sensor unit

③ F/D部 (Frequency to Digital Converter)

アナログ信号で送られた信号はV/F (Voltage to Frequency Converter) で周波数に変換される。音速計のシング・アラウンド周波数はてい倍され、係数を乗じられ音速値に変換される。各周波数はデジタル信号に変換され、表示されると共にICメモ

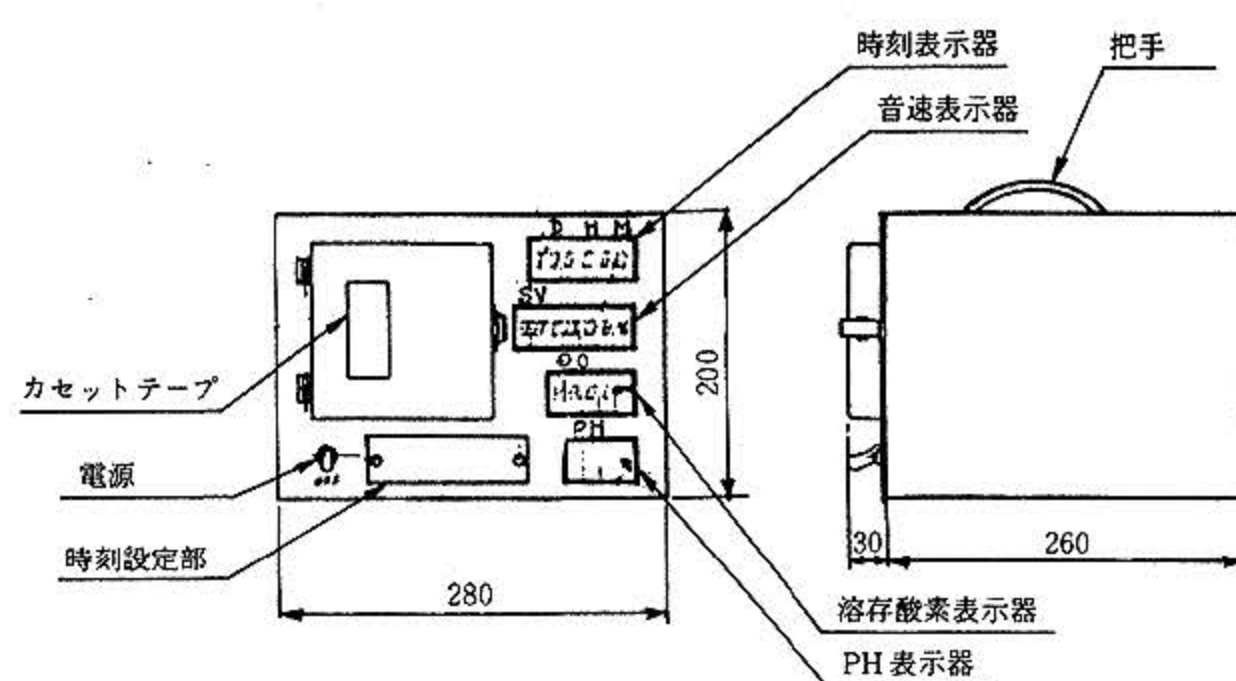


図8 信号処理記録部外形図
Size schematic of data processing and recording system

りにストアされる。

④ 制御部

制御部は、カセット・データ・レコーダデッキのコントロール部へ制御信号を出力している。

入力信号 (計測データ) は6秒ごとにF/Dされ、10計測分が蓄積されるとカセット・データ・レコーダに記録させる。

⑤ カセット・データ・レコーダ

時刻、深度、溶存酸素、PH、音速の各データをBCDで記入する。

(3) 陸上試験内容及び試験結果

製作した装置は耐圧漏洩検査及び性能検査を行い、良好な結果を得た。

① 耐圧漏洩検査

センサ部は、207 kgf / cm² Gで30分間保圧し、減圧後、変形、漏水の有無及び絶縁抵抗 (3 MΩ以上) を検査し良好な結果を得た。

② 深度計性能検査

深度計の性能検査は重錘型圧力試験機で加圧し、深度計のデジタル表示値を検査した。結果は目標精度内であった。

③ 溶存酸素計性能検査

溶存酸素計の性能検査は、気泡ポンプで十分溶存酸素を飽和させた試水及び溶存酸素零の亜硫酸ソーダ5%溶液の試水を使って、大気圧の状態で本装置のデジタル表示値を検査した。結果は目標精度内であった。

④ 音速計性能検査

音速計の性能検査は蒸留水を加圧し、本装置の

デジタル表示値を検査した。結果は目標精度内であった。

⑤ PH 性能検査

PH 計の性能検査は、PH 標準緩衝液を使って、大気圧下及び圧力下で本装置のデジタル表示値を検査した。結果は目標精度内であった。

- ① 大気圧下の性能検査は、PH 標準緩衝液 7，9 を使って行った。
- ② 圧力下の性能検査は、PH 標準緩衝液 4，7，9 を使い加圧して行った。

4. 実海域試験

陸上試験で性能を確認した環境計測装置は「しんかい2000」に装備し、実海域試験を行い、性能を確認した。試験結果は表 3 のとおりである。

(1) 第 1 回実海域試験結果

製作中の PH 計を除き、音速計、溶存酸素計、深度計の実海域試験を行い、結果は音速計計測値を除き良好であった。

試験後、音速計を調査したところ、音波を送受信するトランスミッタとレシーバのセラミックが破損していることが判った。

セラミック製振動子の内部はシリコングリースを充填して、受圧時外在と均圧する構造としているが、分解調査した結果、シリコングリースが少なく、空気が入っていた。この結果、振動子破損の原因は、圧力バランス構造部の組立ミスによると思われる。このため振動子を新替えし、陸上試験を行って、性能及び支障のないことを確認した。

表 3 環境計測装置の実海域試験結果
Test results in sea trial of the ocean profiling instrument

	試験年月日	試験海域	最大試験深度	試験結果			
				深度計	音速計	溶存酸素計	PH計
第 1 回	昭和58年 2 月22日	紀伊水道	960m	○	×	○	/
	昭和58年 2 月23日		1010m				
第 2 回	昭和59年 5 月31日	相模湾	710m	○	×	○	○
	昭和59年 6 月 1 日		750m				
第 3 回	昭和60年 9 月24日	駿河湾	1945m	○	○	○	×

(注) 試験結果欄の○印は良、×印は不良を示す。

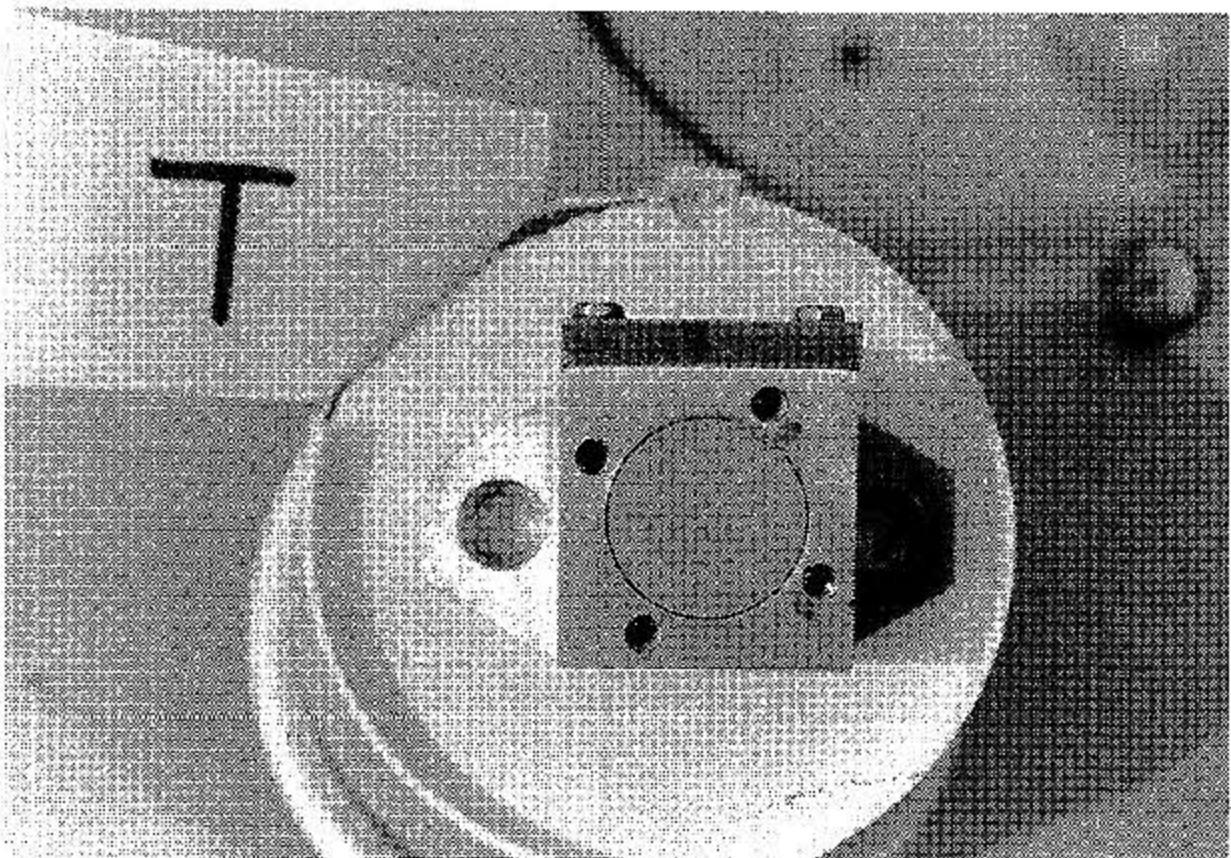


写真 2 クラックの入った音速計トランスミッタ
Cracked transmitter of sound velocity sensor

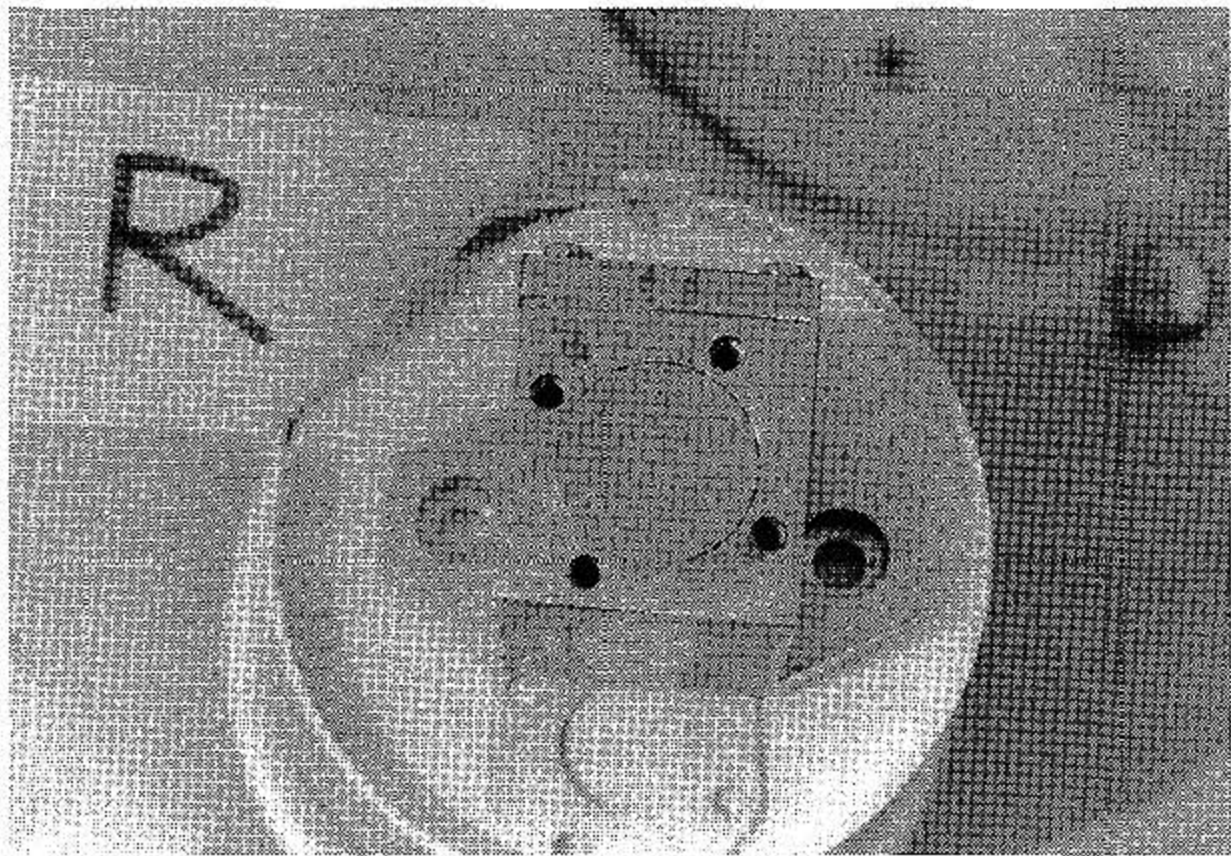


写真 3 クラックの入った音速計レシーバ
Cracked receiver of sound velocity sensor

(2) 第 2 回実海域試験結果

完成した PH 計を付加した環境計測装置の実海域試験を行った。

音速計計測値は、「しんかい2000」の STD で計測した塩分、温度、深度をベースに、Wilson (OCT) の音速の式及び Del Grosso (NRL II) の音速の式で計算した値と大幅に異なっており、かつ、試験後、陸上で水道水を使った温度変化試験 (0 ~ 32℃) でも、前記式の値と大幅に異なっ

た。

このため、原因を調査した結果、IC の不良であることが判り新替えした。

PH 計については、PH 9.88 ～ 8.82 と若干高い値が計測されたが、試験後、PH 計のキャリブレーション結果に基づき補正した結果、PH 9.07 ～ 8.02 となった。

溶存酸素計については、9.66 ～ 1.48PPM が計測されたが、試験後のキャリブレーション結果、計測値の補正はしなくて良いことが判った。

(3) 第3回実海域試験結果

実海域試験に先立ち、音速計は陸上で加圧性能試験（0～207kgf/cm²G）及び温度変化性能試験（0～32℃）を行い、性能を確認した。

また、PH 計は水平に装備しているため、ガラス電極先端部の電解液に空気が混入する恐れがある。このため、この先端部が下向き最下端となるよう、L型とした。

① 音速計

「しんかい2000」に装備しているSTDで計測した、時刻、深度、水温、塩分をベースにWilson（OCT）の音速式及びDel Grosso（NRL II）の音速式で計算した数値と本計測値は、図9に示すよう、ほぼ一致した。

② 溶存酸素計

試験結果を図10に示す。海面近くの溶存酸素量は約3.4PPMで350mまで微減していき、それ以深では1.6～1.8PPMでほぼ一定となった。

第2回相模湾実海域試験結果（図11参照。）に比較し、今回の溶存酸素量が少ないが、場所の違い、沿岸からの距離の違い、条件の違い（今回は沖合から海水が流入していた）等の影響と考えられる。

試験後の陸上でのキャリブレーション結果、補正は必要ないことが判った。

③ PH 計

試験の結果を図12に示す。水深70m辺で急激にデータがシフトしているのが判る。

また、図13に示す第2回相模湾での実海域試験結果（キャリブレーション結果で補正済）と比較しても、傾向が大きく異なる。

PH 計を調査した結果、図4に示した圧力バランスゴムが破損したと判明した。この破損原因は、本試験前にPH 計を破損し、間に合せ的に

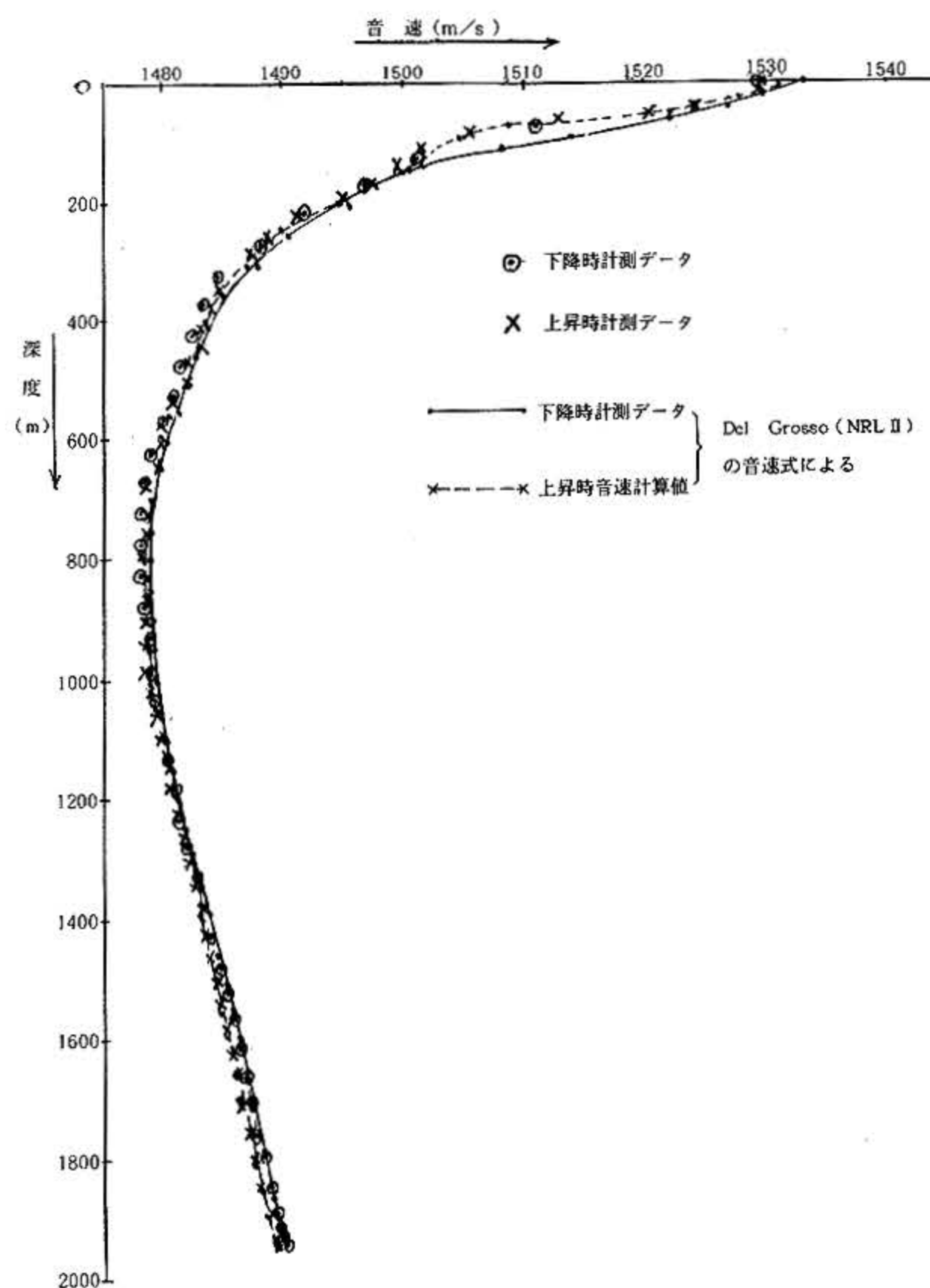


図9 駿河湾における音速計測結果

Test result of sound velocity sensor
in SURUGA BAY

圧力バランスゴム接着部の形状が不十分な外筒ガラスを使ったためであった。

④ 深度計

試験結果は「しんかい2000」のSTDの記録とほぼ同一であった。

⑤ 記録

磁気テープに記録されたデータを「なつしま」のオーシャン・データ・アナライザで、書き出しとグラフ表示した。

1例として、図14に音速と深度の関係をグラフ表示したものを示す。

5. 今後の課題

深度2000mで使用できる環境計測装置をほぼ開発したが、次のことが今後の課題として挙げられる。

- ① 使用実績を増やし、実用性を確立する。

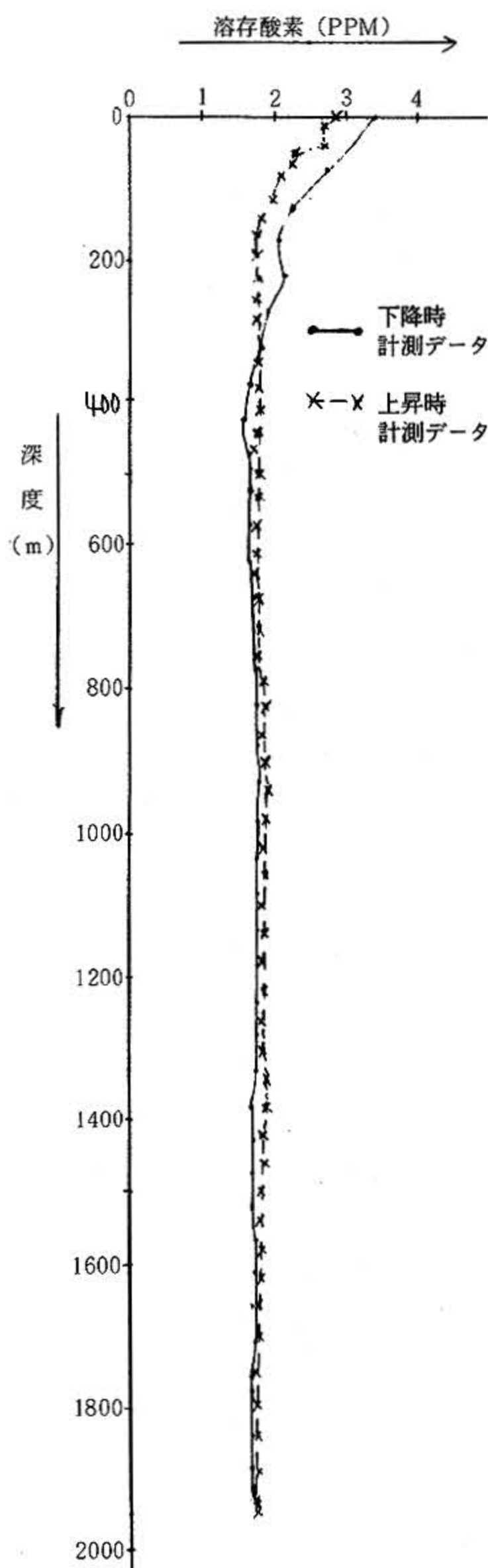


図10 駿河湾における溶存酸素計測結果
Test results of dissolved oxygen sensor in SURUGA BAY

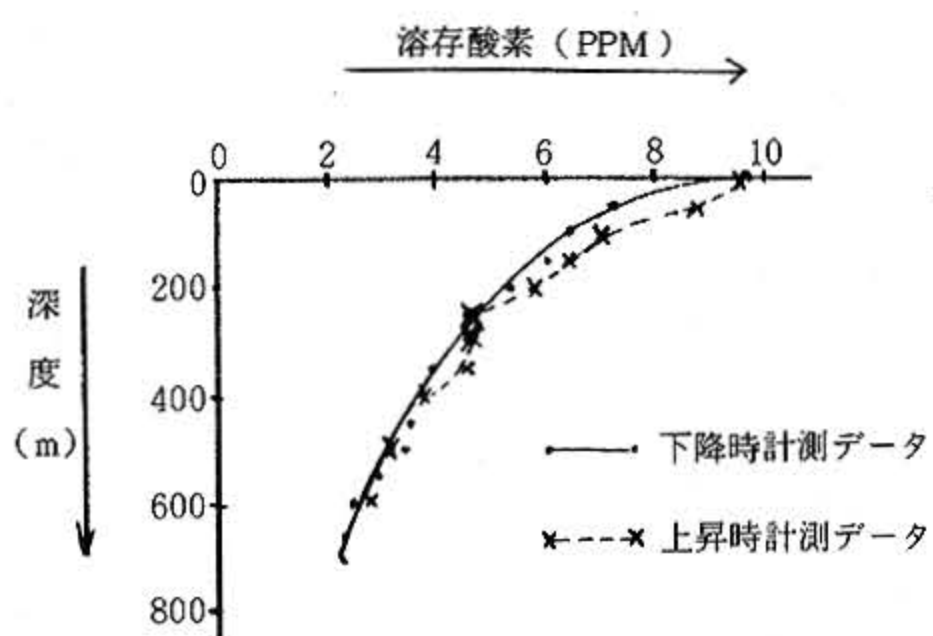


図11 相模湾における溶存酸素計測結果
(59. 5. 31)
Test result of dissolved oxygen sensor in SURUGA BAY

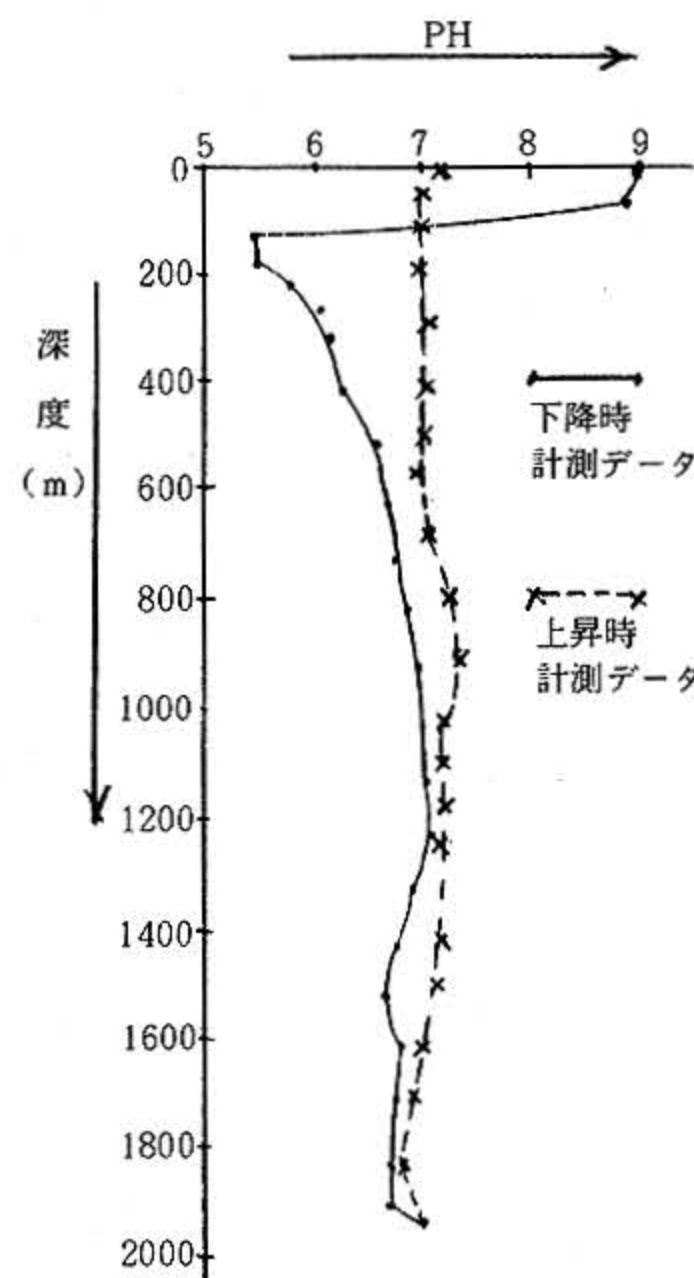


図12 駿河湾における PH 計測結果
Test result of PH sensor in SURUGA BAY

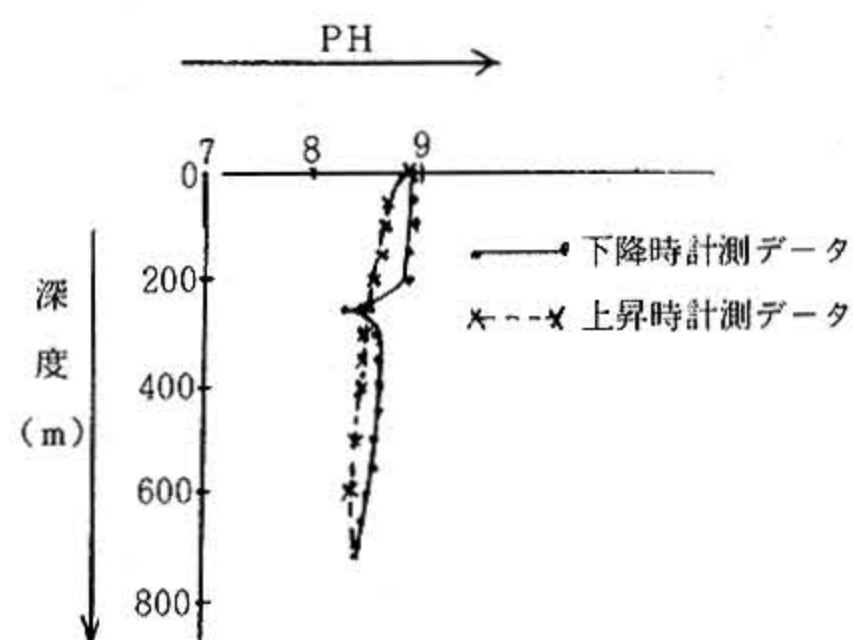


図13 相模湾におけるPH計測結果
(59.5.31) (補正済)
Corrected test result of PH sensor in SAGAMI BAY

② 計測精度を確認する。

PH計、溶存酸素計は、陸上でキャリブレーションを行い精度を確認している。

しかし、これらの機器は実海域で計測した海水を採取、分析して精度を確認していくことも必要である。

6. あとがき

深海はまだまだ未知の世界である。昔、深海は陸上に見られるようなカラフルな世界でないから、潜水調査船に装備するテレビカメラは白黒が良い

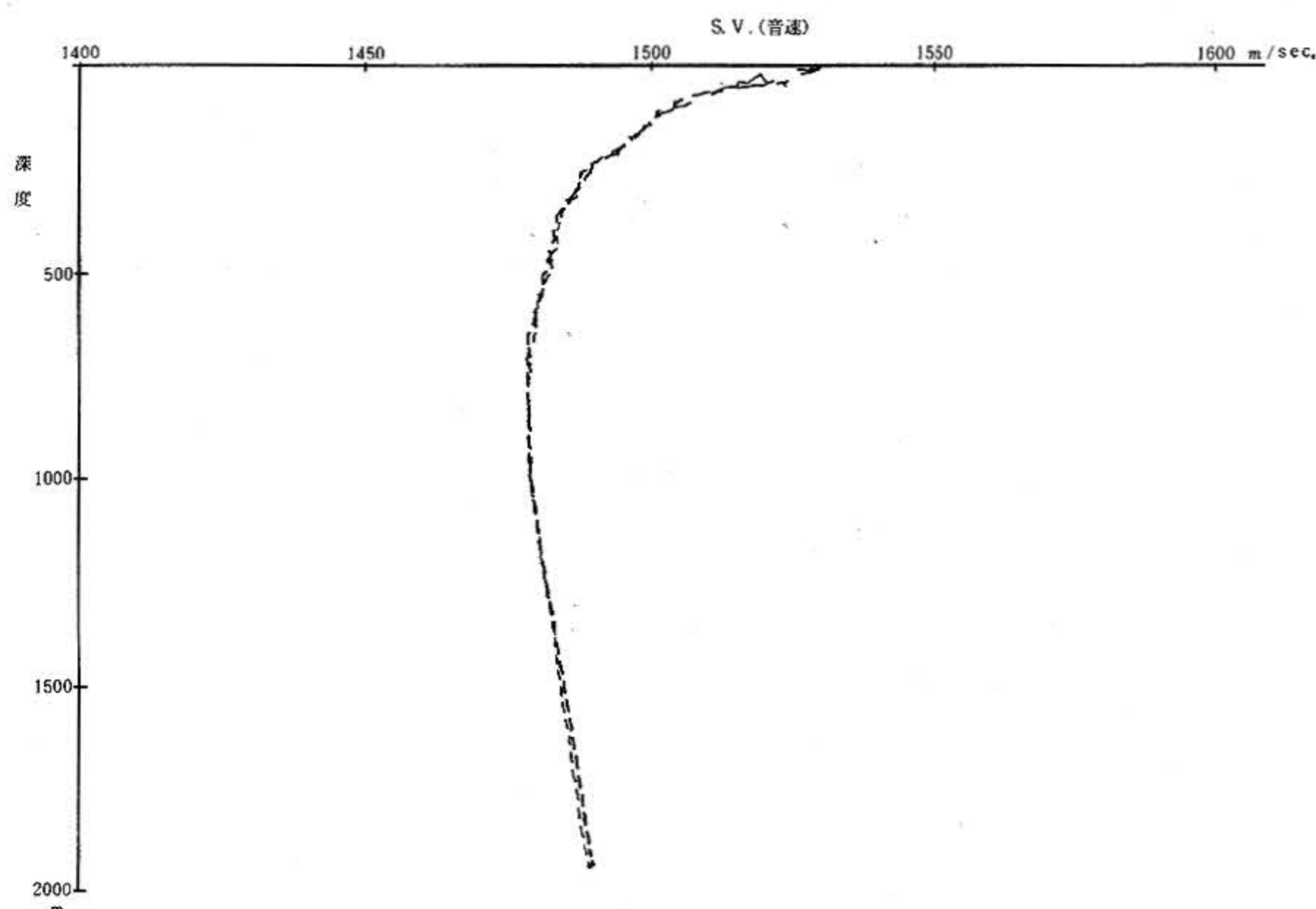


図14 タイプアウト例；音速と深度

Example of X-Y Plotter output of sound velocity profile

と言われていたようである。しかし、実際に深海に行けるようになり、調査が進展すると、カラーテレビでないと不具合であるとの要望が強くなって来た。

調査観測機器は潜水調査船の目的達成のための重要な武器であるが、このように調査の進展に伴い変遷するものでもある。

このため、開発した調査観測機器は大いに使用して頂き、研究成果を挙げて頂くと共に、使用者の要望をとり入れ改良すると共に、必要に応じ新しい調査観測機器を開発していくことも重要である。

ユーザの御協力を今後共お願いする次第である。

文 献

- 1) 海洋音響研究会昭和50年度深海機器委員会, "昭和50年度深海機器委員会報告"
- 2) V. A. Del Grosso, "New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)" J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, No. 4, October 1974.
- 3) V. A. Del Grosso AND C. W. MADER "Speed of Sound in Sea-water Samples", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 52, No. 3, February 1972.
- 4) "Preliminary Report of The Hakuho Maru Cruise KH-75-3 (Lyra Expedition) May 14-June 2, 1975 Western North Pacific" Ocean Research Institute University of Tokyo, 1981.
- 5) "Preliminary Report of Hakuho Maru Cruise KH-82-5 22 November 1982-24 February 1983 The eastern Pacific Ocean" Ocean Research Institute University of Tokyo, 1984
- 6) 小山忠四郎, 半田暢彦, 杉村行勇共著 "湖水・海水の分析" 講談社サイエンティフィク
- 7) 海洋音響研究会1984年, "海洋音響基礎と応用"
- 8) 山下熙, 1976年, "PH測定" 計量管理協会編
- 9) 日本規格協会, 1971年, "PH測定用ガラス電極" JIS Z 8805-1963
- 10) W. Michael krebs, "Dissolved Oxygen Measurements In Brewery Systems" MBAA Technical Quarterly, Vol. 12, No. 3, 1975.

(原稿受理：1986年3月29日)