



Title	流速・密度の鉛直プロファイル計測システム
Author(s)	金成, 誠一; KANARI, Sei-ichi; 小賀, 百樹 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 50, 33-45
Issue Date	1988-02-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.50.33
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14189
Type	departmental bulletin paper
File Information	50_p33-45.pdf



流速・密度の鉛直プロファイル計測 システム

金成 誠一・小賀 百樹*・竹内 謙介

北海道大学理学部地球物理学教室

矢 津 敏 弘

アレック電子株式会社

(昭和62年11月25日受理)

A Vertical Profiling System of Horizontal Current Velocity, Temperature, Salinity and Density

Sei-ichi KANARI, Momoki KOGA* and Kensuke TAKEUCHI

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

Toshihiro YAZU

ALEC ELECTRONICS Co Ltd.

(Received November 25, 1987)

A free-falling velocity, temperature and conductivity profiling system was developed. The instrument can measure and record weak inductive electric currents, produced by the motion of the sea through the geomagnetic field, as well as temperature and electric conductivity of sea water to the depth of 1000 *m*.

The instrument has length of 1.05 *m* and diameter of 28 *cm*, weight of 34.2 *kg* in air, -6.0 *kg* in water without the sinking balast. The falling rate in the present test performance is about 120 *cm/s* and the rotation rate is about 4.2 *rad/s*. Each data pair is sampled at every a quarter of rotation and memorized on the 98 *K bytes* IC logger, installed within the instrument.

The results of field tests show that the measured quantities have considerable quality and the converted data set is available to treat not only the vertical structures of horizontal currents, temperature, and salinity, but also vertical structure of fine scale turbulent mixing in the real ocean.

* 現所属：琉球大学理学部海洋学教室

* Present affiliation : Department of Oceanography, Ryukyu University

I. はじめに

著者らは昭和56年からフリーフォール型電磁流速プロファイラーの開発研究を進めてきたが、昭和58年に計測深度300 mまでの流速プロファイラー (**SEMVP**) を完成し、著者らの考案によるシングルセンサー方式 (Sanford et. al, 1974 はダブルセンサー方式を採用) の有効性を確認した (金成, 1983)。しかし、**SEMVP** では流速分布計測に主眼が置かれ、また、試作が目的であったために海上での作業性という点にそれほど留意されなかった。

通常、流速プロファイル観測は流れの場の構造を知るために行なわれるだけでなく、流れの場の微細な力学構造を知り、物理量の分布と流れの場の関係を研究するために行なわれる。現状では、流れに密接に関係する密度場は流速プロファイル計測とは別個の測器で非同時的に測定されている。このために、微細スケールの現象に関しては、流速場と密度場の正確な対応は必ずしもつけ難い。こうした点を考慮して、昭和61年度から、流速、水温、塩分(電気伝導度)のプロファイルの同時計測を目的とする測器 (**VCTP**; Velocity-Conductivity-Temperature-Profiler の略) の開発を行い62年3月にその試作が終了した。この測器の開発は文部省科学研究費補助金(試験研究(2))の援助によって行なわれたものであるが、試作にあたっては **EMVP** による観測経験をふまえ、実用性並びに取扱い易さにも十分な注意が払われた。

本報告では、**VCTP-1000** 完成体の諸元・性能の概要並びに現場実験観測の結果について述べる。なお、**VCTP-1000** の名称の後半の数字「1000」は計測可能深度1000 mの意味である。

II. VCTP-1000 の概要

地球磁場内で、一定長さのコンダクターを長さの中心を中心に水平に回転させつ、自由落下させる。コンダクターは回転しながら水平流速と落下速度の合成ベクトル方向に移流しつ、地球の水平ならびに鉛直磁場を切る。この時にコンダクターの両端に誘起される電圧を測定して逆に流速を知ることができる (Sanford, 1971)。

実際には、コンダクター (絶縁管中に封入された濃度一定の塩水) の両端の電圧を測定する代りに、絶縁管中央を絶縁隔壁で仕切り、隔壁の両側に電極を置いて両側のコンダクターを外部の海水を通して端絡するような閉回路を構成する。この閉回路をソルトブリッジと呼ぶが、基本的な構造は **SEMVP** の場合と全く同じである。

この閉回路のコンダクターと電極がソルトブリッジアームと呼ばれているものであるが、**SEMVP** では、アーム全長が約60 cmであった。**VCTP-1000** では、アーム長が28 cmに短縮され、アーム全体が **VCTP-1000** 本体内に完全に収納され、作業時の破損の恐れが全くなかった。

沈降速度は圧力センサーと内蔵クロックから計算され、流速成分に対応する電極電位データのサンプリングは内蔵のコンパス (フラックスゲート型) によって制御される。こうした流速算出に必要な一連のデータは、他の水温、電気伝導度のデータと共に内蔵のICメモリーロガーに収録される。したがって、本体の投入と回収をまわってはじめて測定データが入手できる。このために、

本体の回収装置はきわめて重要な部分を占める。VCTP-1000の本体は正の浮力(浮力6 kg)を与えられているが、投入時は全体の水中重量が約3 kgになるようにバラストをつける。このバラストはリリース装置によって所定深度で自動的に切り離され、本体は再浮上する。

海面に浮上するとVCTP-1000上部のトランスミッターおよびキセノンフラッシャーが動作を始め、浮上地点を観測者に知らせる。

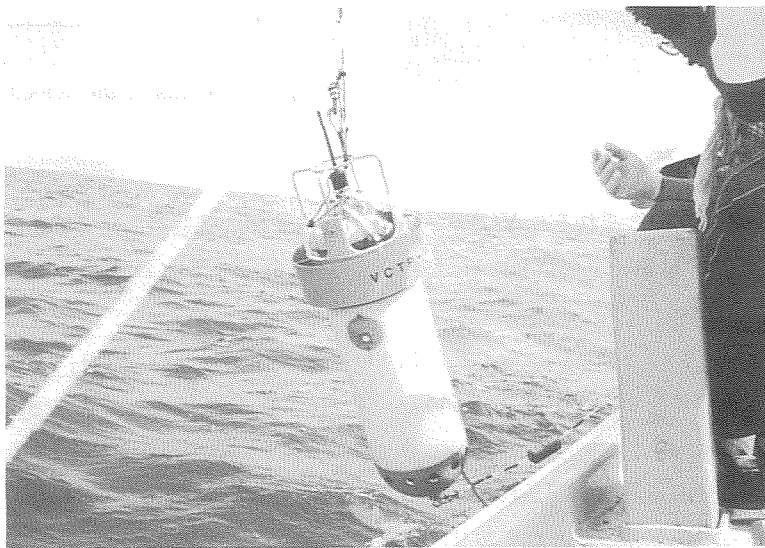
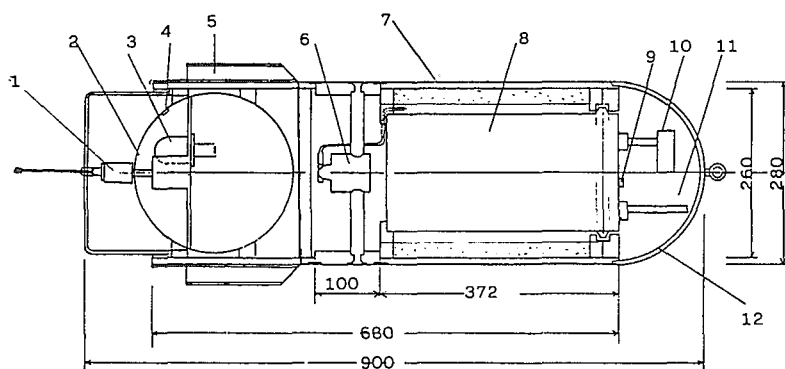


Plate 1. VCTP-1000 about to be launched.



- | | |
|------------------|---------------------------|
| 1. RADIO BEACON | 7. OUTER SHELL |
| 2. GLASS FLOAT | 8. ELECTRONIC COMPARTMENT |
| 3. XENON FLASHER | 9. PRESSURE |
| 4. POWER S.W. | 10. CONDUCTIVITY |
| 5. ROTOR FIN | 11. TEMPERATURE |
| 6. SALT BRIDGE | 12. NOSE CORN |

Fig. 1. Components of VCTP-1000.

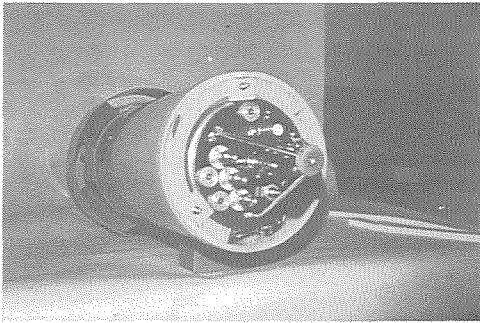


Plate 2. Sensor assembly on the front panel of sonde.

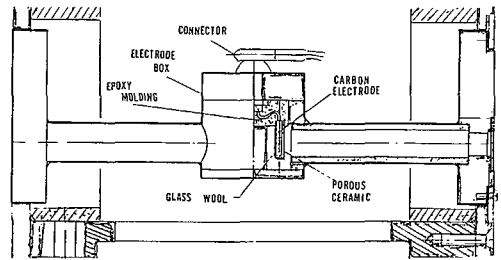


Fig. 2. Details of the velocity sensor.

Plate 1 および Fig. 1 にそれぞれ VCTP-1000 の外観並びに構造断面図を示す。送信用アンテナを除く VCTP-1000 本体全長は 90 cm, 空中重量 34.2 kg, 外径 28 cm, 平均沈降速度 120 cm/s, 自転角速度 4.2 rad/s である。

主要電子回路収納部は外径 18.0 cm, 長さ 37 cm の耐圧円筒容器からなり, 先端のフランジ面に各種センサー, スイッチ類が配置されている。フランジ面 (センサーゾンデパネル) の部品配置を Plate 2 に示す。

中央部よりや、後方寄りに配置された流速センサー (ソルトブリッジアーム) は VCTP-1000 の胴体を貫通する形に取りつけられており, センサーの着脱が容易に行なわれる。後方の耐圧ガラス球はフラッシャー (ノバテック社製 ST-400AR) と電源が収納されており, この電源は, ガラス球の上部を貫通して取り付けられている送信機 (ノバテック社製, RES-700AR) の電源も兼ねている。流速センサーの後方に, 直径 37 cm の薄形円筒殻で防護された 4 枚の回転翼が取り付けられている。また, 先端部のセンサー類は多数の通水孔を持つ半球状のプラスチックカバーで保護されている。

1. 各種センサー

1. 1. 流速センサー

流速センサー (ソルトブリッジアーム) の構造を Fig. 2 に示す。電極は中央が仕切られた円筒形電極ボックス内部に収納されている。ボックス内のふたつの電極室はそれぞれ標準海水が封入されている円筒状のアームにつながり, それぞれのアームの先端はボラスガラス栓を界して外部海水に接する。電極材には新たに開発した焼結カーボンが使われた。この電極の使用により, 水温, 塩分の変化によるオフセット電圧変動や雑音の影響を最小にすることができた。

流速センサー出力感度は中緯度の ± 2 m/sec の流速に対し $\pm 30 \mu\text{v}$ の出力電圧が得られるように設計された。この出力信号は, 0.08~3.5 Hz の帯域フィルターを経て 96.48 db の増幅により 0 ~ ± 2 v の出力電圧となる。

1. 2. 方位センサー

VCTP-1000 の計測値のサンプリングタイミングは **SEMVP** と同様に、フラックスゲート型コンパスの出力によって制御されている。コンパスは水平 x, y の 2 成分出力型で、鉛直軸まわりに回転することにより、互いに 90° 位相のズレた正弦波が出される。この波形の整形・微分により **VCTP** が 90° 自転する毎に正負のパルスが発生する。流速センサーの水平軸が流速成分 U (東西成分) および V (南北成分) と直交する時にパルスが発生するようにコンパスが設定されており、このパルスにより U, V のサンプリングゲートを制御し各成分のサンプリングが行われる。

1. 3. 水温センサー

水温センサーには 100Ω の白金測温抵抗体が使われた。測定レンジ $5 \sim 40^\circ\text{C}$ に対し、 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ (分解能 0.01°C) の精度、時定数は 0.25 秒である。

1. 4. 電気伝導度センサー

電気伝導度はアレック電子製の Model ADM-30 型 **CTD** に使われている電磁誘導型センサーと同型のものを用いた。測定レンジは $20 \sim 60 \text{ mm mho/cm}$ で精度は $\pm 0.01 \text{ mm mho/cm}$ である。

1. 5. 圧力センサー

圧力センサーは $0 \sim 2100 \text{ m}$ レンジの米国セトラシステムズ社の静電容量型圧力センサー、Model 205-2 型を用いた。精度は $\pm 0.11\%$ 、直線性 $\pm 0.1\%$ 、ヒステリシス $\pm 0.05\%$ である。圧力センサー出力は、流速換算式に含まれる沈降速度の算出に併用され、流速値の精度に関係する要因のひとつではあるが、 $0 \sim 35 \text{ kg/cm}^2$ までの加圧試験による出力較正結果では偏差が $\pm 0.2 \text{ m}$ 以内に取りっており、これは流速精度に換算して $\pm 0.2 \text{ cm/s}$ のオーダーの変動に相当する。したがって、流速精度への影響は大きくない。

2. データロガー

VCTP-1000 の内部データロガーは 64 キロビットの CMOS スタティックラム (SRM20 4C) 12 個からなる 96 キロバイトメモリーで構成されている。収録データは各項目 2 バイト (13 ビット) で 6 項目 (計 12 バイト) が 1 データとして収録される。したがって、ロガー容量は 8000 データ分に相当する。

データ読み出しはシリアルデータの形で一担、外部のインターフェイスボックスに読み込まれ、そのあとマイクロコンピュータのフロッピーディスクに収録される。データ転送速度は 1 データ (75 ビット) あたり 240 マイクロ秒で、8000 データの転送には 24 分かゝる。

3. 回収補助装置

VCTP-1000 は完全フリーフォール型で、観測中は本体と船の間の物理的結合は一切ない。したがって、測定データは **VCTP-1000** の回収によってはじめて入手できる。所定の深度で、沈降時に装着したバラストを確実にリリースして再浮上すること、また、再浮上時の位置もし

くは本体の発見が容易であることが共に重要である。

VCTP-1000 は耐圧限界が 1000 m であるので 1000 m 以深の沈降は絶対に避けなければならない。現在、バラストのレリーズ装置は **SEMVP** で開発した圧力式レリーズおよび着底レリーズの2種類があり、 1000 m 以浅の海域の観測には着底レリーズ、 1000 m 以深の水域での観測には圧力式レリーズを使いわけの必要がある。

浮上の確認および本体の発見（特に夜間）を容易にする回収補助装置として、米国ノバテック社の **RFS700AR** 電波発信機および **ST-400AR** キセノンフラッシャーを耐圧ガラス球内に装着したものをを用いた (**Plate 3**)。この系は、センサーゾンデ部とは電氣的に独立しており、送信・フラッシャー同時起動のマグネットスイッチが取り付けられている。

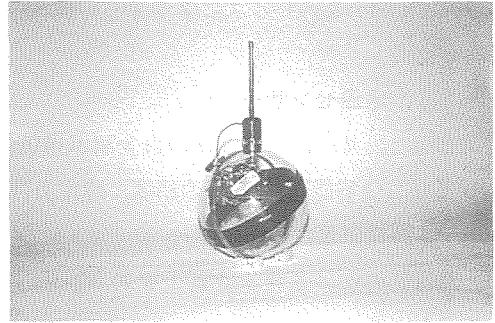


Plate 3. Flasher and Transmitter compartment.

たゞし沈降、浮上途中の水中では送信、フラッシングが共に不用であるので、水没中は自動

的に電源が遮断される。送信波は出力 200 mW 、 156.575 MHz の PCM 変調波である。また、フラッシャーの点滅は $1\text{ 秒}1\text{ 閃}$ で行われる。

4. データ処理装置

データの読み出しおよびそのあとの測定データの処理は **PC-9801-VX** によって行われる。流速データへの換算、塩分、密度の計算はすべて **PC-9801-VX** 上で行われる。流速換算には、観測地点の磁場強度の水平、鉛直分力の値が必要であるが、このデータは観測点の緯度、経度を入力するだけで自動的に計算される。(1)サンプル時間、(2)深度、(3)水温、(4)電気伝導度、(5)流速東西成分、(6)流速南北成分、(7)沈降速度の7項目の作表および鉛直プロファイルのディスプレイ上への表示が基本処理の第1段階であるが、続いて、水温、塩分、圧力のデータに基づく密度 (σ_t) を算出し、深度 0.5 m 毎に内挿された各データの作表、作画処理が行われる。

III. 観測試験結果

完成機による観測実験は昭和 61 年 7 月 30 日に余市沖の水深 50 m 地点 (着底レリーズ使用) および昭和 61 年 10 月 31 日に積丹半島北西の海洋海山周辺海域 (水深 2300 m) の地点 (圧力式レリーズ使用) で行われた。

設計段階での沈降・自転特性は、バラスト装着時の水中重量 3.28 kg に対し、沈降速度 70 cm/sec 、自転角度 3 rad/s であった。仕上り時の水中重量は 4.28 kg で、これに対する沈降、自転速度の計算値はそれぞれ 112.6 cm/s 、 $4,468\text{ rad/s}$ でほぼ計算値と一致している。

余市沖における測定値の鉛直プロファイルを **Fig. 3** に示す。 2 m から 44 m までの各プロファ

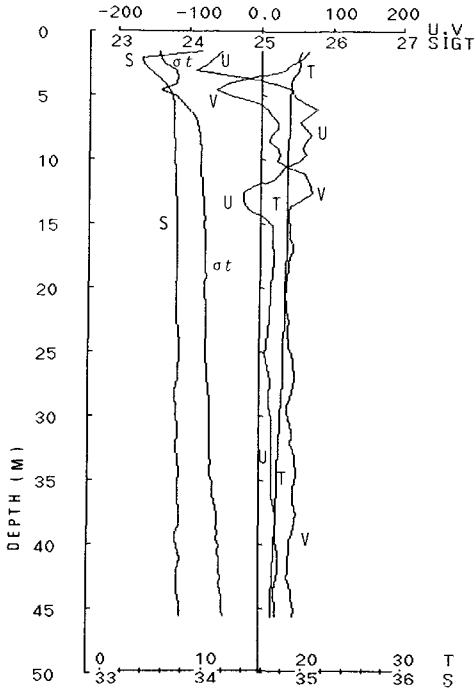


Fig. 3. Profiles taken at 5 km off north of the Oshoro coast, Hokkaido. *E*–*W* and *N*–*S* components are shown by *U* and *V* respectively. *T* is temperature ; *S* is salinity ; σ_t is density calculated from *T* and *S*.

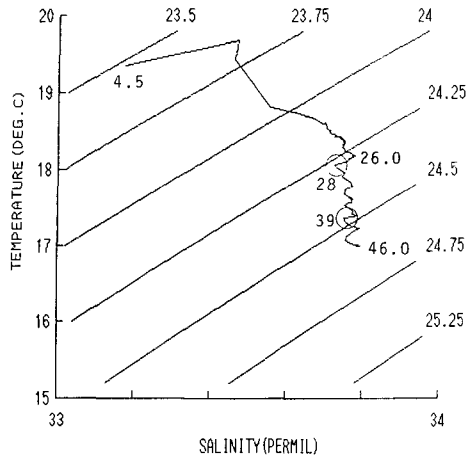


Fig. 4. *T*–*S* diagram at Oshoro station, drawn with the measured *T*, *S* profiles.

イルのうち、流速 (*U*, *V*) および密度 (σ_t) のスケールは図の上部に、また、塩分 (*S*) および水温 (*T*) のスケールは図の下側に附されている。

Fig. 4 は測定された 5 m 以深の水温、塩分のデータを *T*–*S* 図上に図示したものである。**Fig. 3** の密度プロファイルに見られる表層 4 ~ 5 m 附近の密度逆転は *T*–*S* 図上には示されていないが、*T*–*S* 図に○印で示した部分は 5 m 以深での弱い密度逆転層で、**Fig. 3** の密度プロファイルにみられる 15 m 層および 43 m 層の弱い密度逆転に対応する。最初の密度逆転は *u* 成分の強いシア一部分と対応し、シア不安定の結果とも考えられる。また第 2 の密度逆転は必ずしも強い流速シアとは言えないが一応シアと対応しているように見える。

水温プロファイルでは 4 m 以浅に薄い水温躍層があり、*U*, *V* とともに躍層と対応して強い流速シアを示している。4 ~ 5 m 附近の大きな密度逆転は *V* 成分の西向流の最強層と対応しており、躍層附近の西向き貫流とシアによる鉛直混合を示唆しているように見える。

Fig. 5 は、**Fig. 3** の *U*, *V* 成分プロファイルを基に、流速ベクトルの鉛直分布を画いたもので、最深部 (44 m) の流速が零になるように流速分値をシフトしてある。この図からも、15 m 以浅の西向き表層流に 4 ~ 5 m から 10 m 層にかけて、深さと共に西向から東向に変化する厚さ

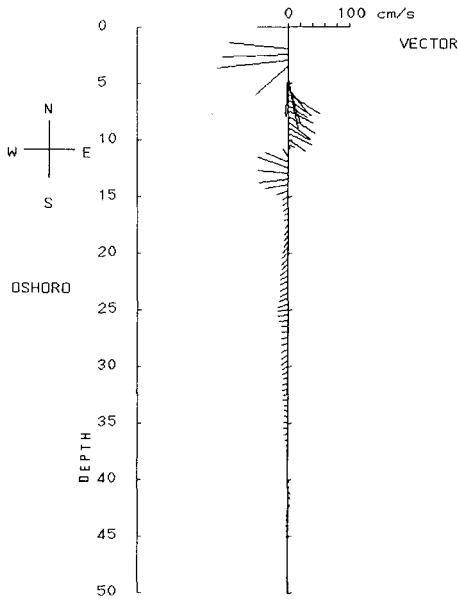


Fig. 5. Velocity vector profile at Oshoro station. U , V components being shifted as that the near bottom velocity becomes zero.

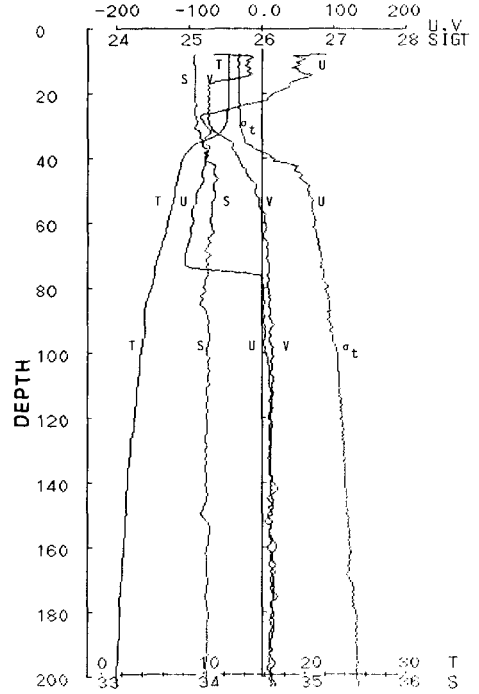


Fig. 6. Profiles taken at the station near the Siribeshi-Kaiyo Seamounts. Notations of the profile are same as in Fig. 5.

10~12 m 程度の貫入層の存在が示唆される。

Fig. 6 は海洋海山附近の北緯 43 度 56.6 分，東経 139 度 10.6 分で観測された 5 m から 414 m までの流速，水温，電気伝導度，塩分，および密度のうち，5 m から 200 m までのプロファイルを示したものである。元のデータには，35 m 層のシャープな水温躍層内に，水温と電気伝導度の時定数差にもとづくと思われるスパイクが塩分に現われている。Fig. 6 では，こうしたスパイクはフィルターによって除去してある。80 m 以浅での流速は U , V 共に比較的大きく， U 成分は，表層 20 m 以浅で平均 50 cm/s の東向流，20~75 m で平均 90 cm/s の西向流，また V 成分では，表層 16 m から 50 m にかけて 80 cm/s の南向流がみられる。観測海域に強い低気圧が接近中であつた上に，強力な季節風が吹き海面は波高数 m を越える荒天であつた。Fig. 7 は流速ベクトルのスティックダイアグラムであるが，表層混合層に対応する表層 30 m 附近までの流速ベクトルは，強力な西風による典型的な風成流のパターンに近い。30 m から 70 m 層の強い西向流の原因はこのデータだけでは特定できないが，この年の 11 月に観測された水路部の音波ログデータ (Fig. 8) をみると，この附近は対島暖流の西向分岐流が存在する海域で，プロファイルの西向流は，こうした分岐流の一部とも考えられる。水温，塩分データに基づく $T-S$ 図は Fig. 9 に示す。この図は Fig. 6 の T , S ではなく，フィルターする前のデータを用いてそのままプロットしてあるので， $T-S$ 図中の大小の円で示すところに顕著な密度逆転がみられる。 $T-S$ 曲線の途中の数

字は深度 (m) を示す。図から明らかなように、34.5 m に著しい密度逆転が現われており、その他、37 m, 58 m, 67.5 m, 85.5 m, および 150 m の各深度にも値は小さいが明瞭な密度逆転が認められる。このうち、最大スケールの密度逆転である 34.5 m 層の値に注目してみよう。Fig. 10 は T-S 図に使われた T, S およびこの T, S から計算した σ_t のプロファイルのうち 12 m から 82 m までの値を抜き出してプロットしたものであるが、丸印で示した塩分および密度のスパイ

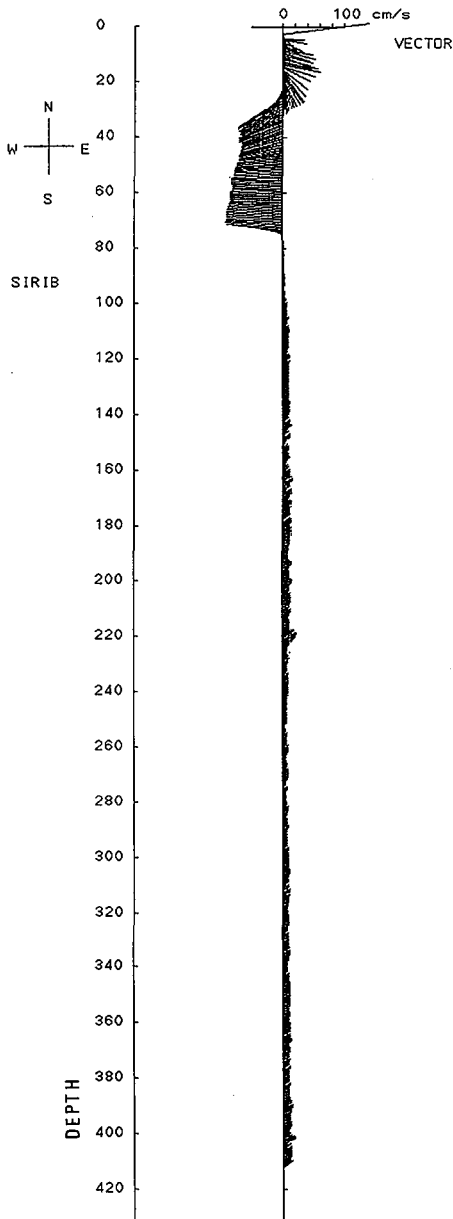


Fig. 7. Velocity vector profile at Siribeshi station.

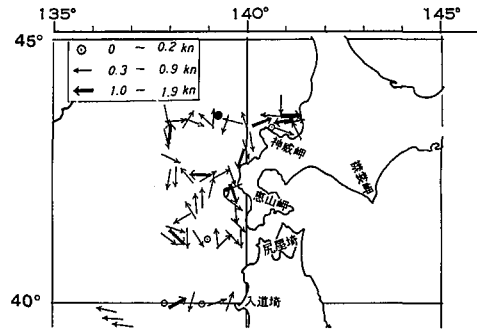


Fig. 8. Surface currents of the Tsushima Warm Current region at south-western coast of Hokkaido, from Nov 19 to Dec 3, 1986, measured by the Coast Guard Survey Ship (Redrawn from Kaiyo Sokuho, No. 23, 1986). Black circle shows the location of the VCTP Cast.

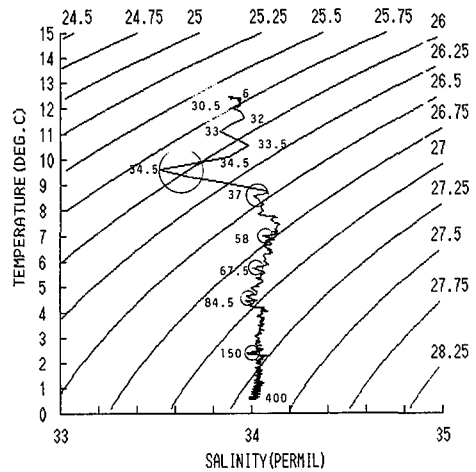


Fig. 9. T-S Diagram at Siribeshi station, drawn with the measured T, S profiles.

クは同一深度に現われている。塩分のスパイクは水温躍層の中の水温傾度最大の深度と一致しており、これは明らかに電気伝導度と水温のセンサーの時定数の差による典型的なスパイクと思われる。今回使用した水温及び電気伝導度センサーは、こうしたスパイク対策として、1 m/s 以内の沈降速度で使用するように設計されているにもかかわらず、バラスト重量が予定値を若干上まわったために沈降速度が 120 cm/s と使用予定の 75 cm/s を超えてしまっていた。これが、水温傾度の大きな躍層でスパイクを生じさせた原因となったものと考えられる。

塩分スパイクに基づく密度逆転以外のより深層の密度逆転が、こうした機器特性によるものであるかどうかを検討してみよう。

Thorpe (1977) は、成層流体中の局所的密度逆転が鉛直混合による水塊の局所変位によって生じたと考え、密度分布を安定成層に並べかえるに要する水塊の鉛直変位を局所混合の空間スケールとみなし、Thorpe 変位 (L_t) なる量を定義している。Thorpe 変位を形成するエージェントが、流速の鉛直シアであれば、成層内のグラジエント・リチャードソン数 R_i の分布と L_t の分布との間には有意な関係が期待される。すなわち、 R_i が臨界値 (0.25) 以下ならば、その層では大きな L_t に出会う確率が大きくなる筈である。

Fig. 11 は、密度、流速のデータに基づいて計算した R_i 、 L_t 、流速シア S_v およびバイサラ周波数 N の分布を示したものである。各プロファイルは計算値を 2.5 m 巾で移動平均したものであり、流速シアは幾何平均値、すなわち

$$S_v = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2}$$

によって、また R_i 及び N を算出する際の密度勾配は Thorpe 変位を求める際の再配列された密度分布から求めた。 R_i 分布のハッチされた領域が臨界値以下の R_i の層を示し、この部分ではシア不安定による混合が卓越していると考えられる。明らかに、 L_t の正負の振巾の大きな層は $R_i < 1/4$ の層と良く対応しており、問題の密度逆転層は測器特性によるものではなくシア不安定の結果であると考えられることができる。

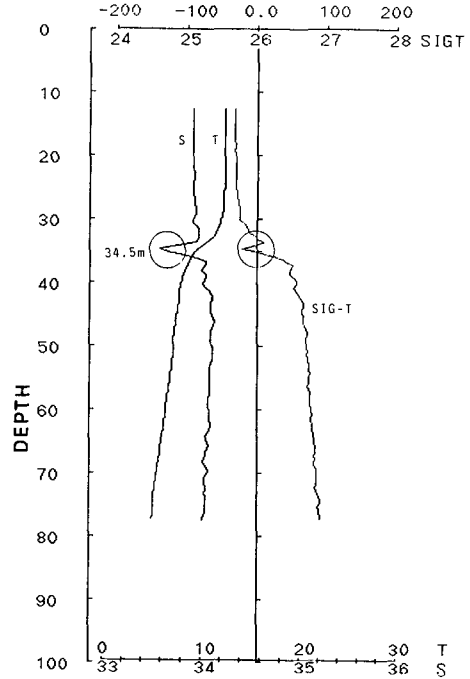


Fig. 10. Salinity and density spikes due to mismatching of salinity and temperature sensors responses.

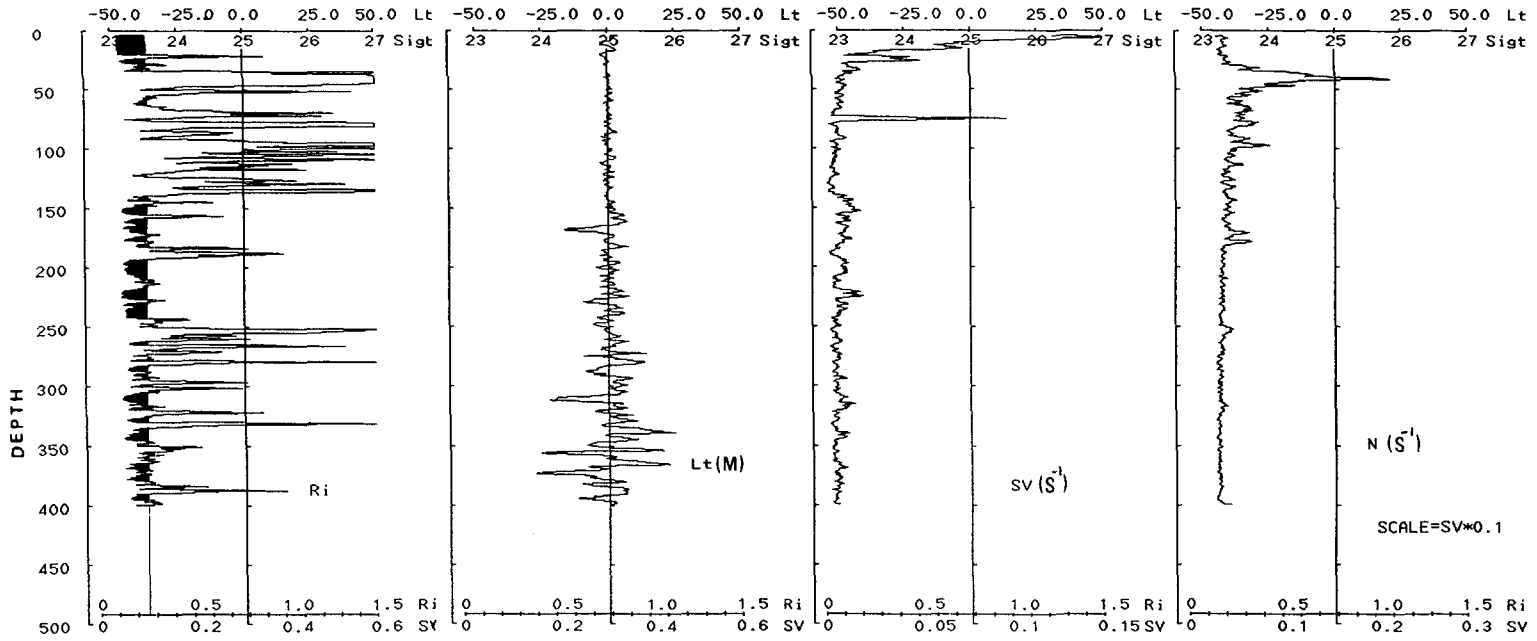


Fig. 11. Vertical profiles of local gradient Richardson Number (R_i), Thorpe displacement (L_t), Velocity shear (S_v) and Väisälä Frequency (N), moving averaged with 2.5 m intervals. Hatched region in R_i -profile corresponds the shear instability layers at where the value of R_i is lesser than critical.

IV. む す び

文部省科学研究補助金・試験研究の援助のもとに、流速、水温、塩分、密度の鉛直プロフィール同時計測装置(VCTP-1000)の開発を行ってきたが、完成機による海上試験の結果、データ取得の点では満足すべき性能であることが明らかになった。しかし、データ解析の結果、一、二の調整を要する点も見出された。そのひとつは、今回のテストに用いたバラスト重量が若干重すぎたために、沈降スピードが 1 m/s を越え、シャープな水温躍層を通過する際に、水温センサーと塩分センサーの時定数のミスマッチングの影響が目立ったことである。この点に関しては、単にバラスト重量を減らせば容易に解決できる問題であり、現在、バラストの軽減によって沈降速度を約 70 cm/s を抑えるよう調整を進めている。

後志海山海域の流速、水温、塩分の測定値に基づき、計測値の総合判定を試みた。判定手段としては、計測値から求めたりチャードソン数 R_i とThorpe変位 L_i の相互比較に依った。この判定方法は絶対的なものではないが、 R_i と L_i の相関に矛盾がなければ、少なくとも相対流速と水温、塩分の計測値が妥当なものであるというひとつの目安にはなり得る。この結果は、大むね満足すべきものであった。しかし、この結果から、流速の計測値の絶対精度までは判定できない。この測器の流速測定原理は地球磁場強度に依存しているために、流速センサーのキャリブレーションは殆ど不可能である。したがって、流速計測値の精度を確定するためには、音波ログを備えた船によって流速プロフィールの同時比較測定を行うのが現在のところ最も有効な較正手段であり、今後機会があれば、そうした測定を試みたい。

本研究に関して、すでに「 1000 m 用CVDT(VCTP-1000)の開発と応用に関する研究」(昭和62年3月)のタイトルで科学研究費補助金・成果報告書が出版されたが、その中のデータ解析では、塩分スパイクと密度スパイクの深度に約 5 m のズレがあり、本論文の結果と若干異なる解釈がなされた。しかし、その後のデータの細密な点検によって、このズレがデータ処理途中のソフトウェアであることが判明した。また、同報告に示した流速値はVCTP-1000以前に開発されたSEMVPで使用した変換式をそのまま用いて算出したが、VCTP-1000では流速センサー端面がSEMVPのように海中に突き出た形ではないことによる補正が必要であり、その補正係数は見かけ上センサー周辺の磁場強度を約1.8倍に高めることが判った。本論文の流速値はこの補正を行ったものである。この補正係数算出方法については稿を改めて論ずる予定である。

謝辞 本研究は昭和60、61年の2年間にわたり、文部省科学研究費補助金(試験研究(2))のもとに行われたものである。本研究を遂行するにあたり、装置の製作面で種々協力を惜しまなかったアレック電子株式会社取締役の戸川弘氏はじめ会社スタッフ一同に謝意を表します。また、現地試験に際しては、東海大学望星丸II世に乗船の便宜を与えてくれた東海大学関係者並びに乗組員一同に併わせて謝意を表します。

文 献

- 金成誠一, 1983. 浅海用電磁式流速プロファイラー, 北大地球物理学研究報告, **42**, 215-228.
- 金成誠一・小賀百樹・竹内謙介・矢津敏弘, 1987. 1000 m用 CVD τ (VCTP-1000) の開発と応用に関する研究. 昭和 61 年度科学研究費補助金 (試験研究(2)) 研究成果報告書, 87 pp.
- Sanford, T. B., 1971. Motionally induced electric and Magnetic fields in the sea. *J. Geophys. Res.*, **76**, 3476-3492.
- Sanford, T. B., R. G. Drever, and J. H. Dunlop, 1974. The design and performance of a free-fall electromagnetic velocity profiler (EMVP). *Technical Rept., Woods Hole Oceanographic Inst.*, WHOI-74-46, 1-114.
- Thorpe, S. A., 1977. Turbulence and mixing in a Scottish loch. *Trans. Roy. Soc. London*, **286**, 125-181.