



Title	浅海用電磁式流速プロファイラー
Author(s)	金成, 誠一; KANNARI, Seiichi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 42, 215-228
Issue Date	1983-10-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.42.215
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14111
Type	departmental bulletin paper
File Information	42_p215-228.pdf



浅海用電磁式流速プロファイラー

金 成 誠 一

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和58年3月9日受理)

A Design and Construction of Free-Fall Electro-Magnetic Velocity Profiler for Shallow Water Use. PROFILER FOR SHALLOW WATER USE.

Seiichi KANNARI

Department of Geophysics, Faculty of Science,

Hokkaido University

(Received March 9, 1983)

This paper describes the design and construction of the free-fall electro-magnetic velocity profiler for the use of shallow water (up to 500 m) areas.

This instrument (SEMVP) is based on the same principle proposed by T. Sanford, except that it has a single velocity sensor. The SEMVP has the electro-magnetic velocity sensor, the pressure sensor and the flux-gate compass, and freely falls with fall velocity from 26 cm/s (for 0.5 kg excess weight) to 50 cm/s (for 1.5 kg excess weight) rotating around its axis. As it has reached to the bottom, an attached recovery system releases weights, and then the SEMVP gains positive buoyancy and turns to the surface.

Measured signals are sampled at every 90 degrees rotation of the SEMVP, which is controlled by the flux-gate compass outputs, and recorded on the 32 kbytes RAM as digital signals.

After recovery of the SEMVP, the recorded signals are read out through a photo-coupler, and a series of data are processed by a micro-processing system.

The basic experiments, system simulation and analysis of motional characteristics of the SEMVP are also described.

The results of preliminary field experiment performed in a shallow water area shows reasonable velocity profiles, though a strict intercalibration is remained.

I. は し が き

深海での使用を主目的とした内蔵記録式アーンデラ流速計の出現に伴い、係留による流速観測手法の研究が積み重ねられ、最近ではこうした観測手法がほぼ確立されたと考えられている。このような係留方式によって得られるデータは、係留深度における流速の時系列であって、流速の鉛直構造を知るためには鉛直方向に多数の流速計を直列に係留する必要がある。しかし、1台あ

たりの流速計の価格、及び直列に多数の流速計を係留する場合の係留システムの規模、さらにはそのシステムの維持管理経費等を考慮する時、かかるシステムが鉛直構造観測には決して適したものではないということは明らかである。特に黒潮主流域のような強流帯中の係留は極めて困難であり、強流域の流れの鉛直構造計測あるいは陸棚域の複雑な流速場の鉛直構造計測には、係留方式とは違った観測手法に頼らざるを得ない。

地球の鉛直磁場を一種の導体である海流が横切ることによって海流中に主ずる電位差を測定し、これから逆に海流の流速を推定しようという方法が Farady (A.J. Williams et al., 1972) によって提案され、Von Arx (1962) によって実用化が進められ現在、G.E.K. として各種海洋観測に利用されているが、Sanford (1971) はこの原理を更に推し進め、自由落下型の鉛直流速計測手法の原理を提案した。これは Sanford, Drever and Dunlop (1974) によって実現され、EMVP (Electro-Magnetic Velocity Profiler) の名のもとに、湾流の流速分布や海洋乱流の観測等に利用されている。

Sanford らによって開発された EMVP の第 1 号機は直径 30 cm、長さ 3 m の魚雷型のカプセルに 50 cm の回転翼が 4 枚取り付けられた重量 70 kg のものであるが、第 2 号機では流速センサーの改良により回転翼（流速センサーの収納部をも兼ねていた）が極度に小型化され、またカプセル自体は約 1.5 m とやや短縮されてはいるが、音響機器及び回収・探査用の附属装置を含めると全長 3.5 m にもなり、取り扱いが容易ではない。

著者は陸棚及び沿岸海域の流速分布計測のための浅海用流速プロファイラーの基礎的な研究並びに開発を昭和 56 年度から行なってきたが、浅海を対象とするために Sanford らの EMVP とは違ったデータ収録・処理方式を採用しており、また、Sanford らの 2 流速センサー方式と違って、1 流速センサー方式を採用し、更にシステムの小型軽量化を追求するなど、いくつかの新しい試みを行なった。以下に、著者が開発した EMVP の概略について報告するが、浅海域 (Shallow waters) を対象にしているということで、本文中では SEMVP の呼称を用いる。

II. 測定原理

長さ L の絶縁された塩水セグメントが地球磁場 F の中を V で運動する時、塩水セグメント両端には $(V \times F) \cdot L$ の電位差が発生する。地球表面に固定した直角座標 (x, y, z) に関する単位ベクトル成分を (i, j, k) とすると、 $F = (F_x \cdot i + F_y \cdot j + F_z \cdot k)$ 、 $V = (u \cdot i + v \cdot j + w \cdot k)$ であるから、長さ L の塩水セグメント軸を水平に保ったまま回転する場合の電位差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = [-F_z (v - u_s) + F_y w] L \sin \omega t + F_z (u - u_s) L \cos \omega t \quad (1)$$

で与えられる。但し u_s 、 v_s はセグメント両端が海水に接している場合の周囲海水中の電位に基づく補正項で、海底堆積物と海水のコンダクタンス比を σ 、水深を D とする時、

$$\begin{bmatrix} u_s \\ v_s \end{bmatrix} = \frac{1}{D(1+\sigma)} \int_0^D \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} dz$$

で与えられる。 w はセグメントの落下速度、 ω はセグメントの廻転角速度である。時間の原点はセグメント軸が NS 方向に向いた時とし、その瞬間の電位差を $\Delta\phi_y$ 、又 EW の方向になった時の電位差を $\Delta\phi_x$ とすると

$$\Delta\phi_x = [-F_2 (v - v_s) + F_y w] L, \quad \Delta\phi_y = F_z (u - u_s) L \quad (2), (3)$$

となる。磁場の成分 F_z 及び F_y が既知ならば、落下速度 w 及び NS, EW 方向でのセグメント両端の電位差を測定することにより、相対流速 $(u - u_s)$ 、 $(v - v_s)$ を求めることができる。 u_s, v_s は一般に深さによらない値であり、海底と海水のコンダクタンス比が小さい場合は鉛直平均流速で近似できる量である。したがって、(2)によって得られる流速値は近似的に鉛直平均流速からの偏差値の形で与えられる。以上の計測を行なうにあたり、セグメント両端の電位差を検出するための電極（銀・塩化銀電極）、 w の変動を計測するための圧力センサー及び電位差の検出時刻を制御するための方位センサーなどが必要となる。

III. 流速センサーと温度特性

SEMVP の流速センサーとなる海水セグメント及び電極の構造を Fig. 1 に示す。電極は通常 GEK に使用されているような銀・塩化銀ペーストを焼結したもので、この電極は、長さ約 60 cm、直径 2.0 cm のエスロン管の中央部の絶縁隔壁をはさんで両側に一個ずつ配置されている。エスロン管内には濃度一定の塩水（人工海水）が封じ込んであり、その両端はポラス・ガラス栓を通じて、外部海水と電氣的に接触している。したがって、塩水セグメント中に生ずる電位差に基づく電流は、絶縁隔壁の一方の電極から塩水セグメントを通り、外部海水を経て他方の塩水セグメントに入り、もうひとつの電極に達するような閉路を構成する。この閉路の一部を構成する海水も地球磁場の中を運動しているために、海水自体に電位差が生じており、この効果が (1) 式中の u_s, v_s になっている。

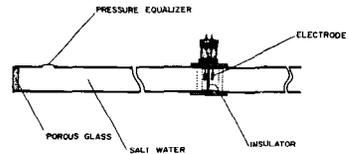


Fig. 1. Velocity sensor construction.

銀・塩化銀電極は SEMVP の最も重要なセンサーであるが、良く知られているように、この電極は温度、塩分の変化に極めて鋭敏であり、電極自身 $350 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 、 $500 \mu\text{V}/\%$ の大きな温度並びに塩分係数を持っている。塩分変化の影響は内部に濃度一定の塩水を封入することにより抑えられるが、塩水セグメントの温度変化は避けられない。幸い、Fig. 1 に示す流速センサー電極部ハウジングの容積を大きくすることにより、電極部の熱容量を大きくすることができる。これによって、周囲温度の変化が電極に達する時間を長くすることができ、温度変化による電極の偏倚電圧はほぼ DC 成分とみなせるようになる。必要な流速信号は塩水セグメントの廻転角速度 ω で変調されているから、適当な高周波フィルターによって温度変化に起因する準 DC 成分と変調流速信号とを容易に分離することができる。

Fig. 2 は、試作流速センサー (Fig. 1) の周囲温度を 10.8°C だけ急激に変化させた時の偏倚電圧

の時間変化(黒丸印)であるが、この場合、流速センサー全体としての温度係数は $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ となっている。Fig. 2 の下方の実線は、電極出力側に 0.01 c/s の遮断周波数を持つ3次のバターワースフィルターを付加した場合の偏倚電圧出力特性であるが、明らかにフィルターによる偏倚電圧の抑制効果が顕著にみられる。同図の上方の実線は流速センサーの偏倚電圧出力時間変化を

$$E_b(t) = 40.74(T_2 - T_1)\{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (4)$$

で近似した曲線を示す。

ここに、 $\alpha = 0.0011253 (1/\text{sec})$ 、 $T_2 - T_1$ はステップ状温度変化の振幅である。流速センサー出力特性近似式(4)は後述のシステムシミュレーションで使われる。

IV. 内部構造とシステムのシミュレーション

Sanford らの EMVP では水平面内で直角に配置した2本の流速センサーにより流速の直角2成分を測定するが、2センサー方式では、2本のセンサーの特性を完全にそろえることが容易ではなく、その維持管理も簡単ではない。

これに対し SEMVP では、一本の流速センサーによって直角2成分を測定するために、センサーのアンバランスの問題とは無縁である

が、直角2成分のサンプリングに時間的なズレがあるために、2成分方式に比べてセンサーの廻転角速度を大きくとる必要がある。設計の段階では、 50 cm/s の沈降速度で毎秒0.5乃至1廻転の角速度を設定し、廻転角速度の変動による誤差の混入を避けるために、信号のサンプリング時刻はフラックスゲート型方位計 (RFD-2 A) の出力によって制御する方法を採用した。すなわち流速の直角2成分に対応する電位差信号のサンプリングは、流速センサーが90度廻転する毎に行なわれるので角速度の変動とは無関係になる。

センサーの出力信号は180度廻転する毎に符号が反転するので、データ処理の段階でその判定処理が必要となるが、これは方位出力信号の直角2成分の和の正負によって判定することが可能である。

上述のように、直角2成分 u 、 v に対応するセンサー信号のサンプリングは、毎秒1廻転の角速

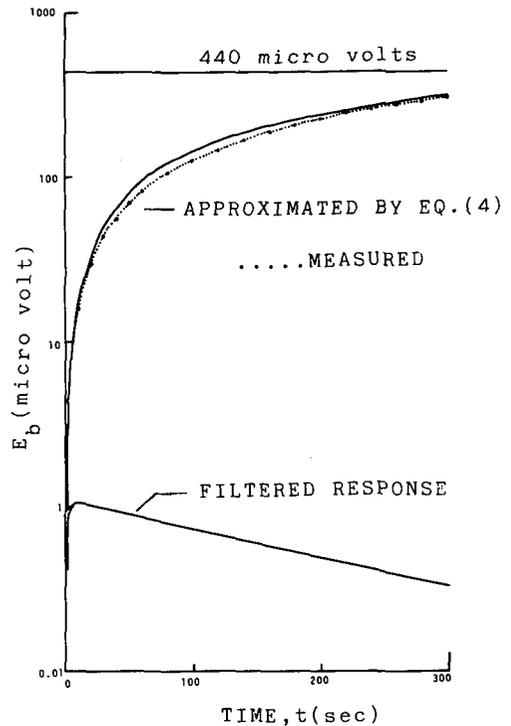


Fig. 2. Bulk response of velocity sensor due to step change in ambient temperature. The dotted line with black circles shows the measured response, and the upper solid curve shows an approximated response given by eq. (4) in the text. The lower solid curve shows the filtered response passed through the third order Butter-Worth CR high-pass filter with a cut-off frequency at 0.01 cps .

度の時約4分の1秒毎に交互に行なわれる。したがって、流速ベクトル算定に必要なレベルの流速分値は各成分の相隣る測得値の補間によって代用される。

以上のような信号処理方式を用いるとして(4)式で表わされるような温度特性の流速センサーと3次のバターワースフィルターで温度成層のある流速場の計測を行なう場合、所定の流速場がどの程度に再現し得るかを計算機によって検討した。

温度分布及び流速分布はそれぞれ(5)、(6)の型を仮定し、この中を沈降速度 50 cm/s、廻転角速度 6.6 rad/s で降下する時の流速センサー出力並びにそれによって求められた流速値を所定の流速値と比較した。

$$T(z) = \frac{1}{2} T_0 (1 + \cos \frac{\pi z}{H}) \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \cos \frac{\pi z}{H} + \begin{pmatrix} u_m \\ v_m \end{pmatrix} \tag{6}$$

流速センサー全体の初期温度を T_p 、沈降速度を w とすると、(5)式で与えられる周囲温度分布中を w で沈降する時の流速センサーの温度変化に対する偏倚電圧出力、 $\epsilon(t)$ は

$$\epsilon(t) = a_0 T_0 \left[\left(1 - \frac{T_p}{2T_0}\right) (1 - e^{-at}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \cos \frac{\pi \omega}{H} (t - \tau) \cdot (1 - e^{-a\tau}) d\tau \right] \tag{7}$$

で与えられ、また、 $\epsilon(t)$ が L_o 、 C_o 、 R 素子で構成される3次のバターワースフィルターを通過した時の出力 $E_{out}(t)$ は

$$\epsilon_{out}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{a_0 T_0 C_o^2 s^3}{1 + 2L_o C_o s^2} \cdot \bar{\epsilon}(s) \right\} \tag{8}$$

で表わされる。ここに $\bar{\epsilon}(s)$ は $\epsilon(t)$ のラプラス変換、 \mathcal{L}^{-1} はラプラス逆変換を表わす。

したがって、流速センサーの廻転角周波数よりも十分低い周波数(0.06 rad/s)にカットオフを持つ高周波フィルター通過後の流速センサー出力 $E_{out}(t)$ は、

$$E_{out}(t) = \left\{ F_z L v_0 \left(\frac{1}{\pi} - \cos \frac{\pi w}{H} t \right) + F_y L w \right\} \sin \omega t + \left\{ F_z L u_0 \left(\cos \frac{\pi w}{H} t - \frac{1}{\pi} \right) \right\} \cos \omega t + \epsilon_{out}(t) \tag{9}$$

で与えられる。

Fig. 3の上段は、 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 、 $u_0 = v_0 = u_m = v_m = 50 \text{ cm/s}$ 、 $H = 20 \text{ m}$ 、 $F_z = 50000 \gamma$ 、 $F_y = 25000 \gamma$ の場合のフィルター通過後の流速センサー出力信号で、流速分布に応じて振幅変調された波形となっている。この信号を所定のサンプリング方式に従ってサンプルし、所定の方法によって信号の符号反転を行ったものを中・下段に示す。

この信号をもとに、流速分布を再現した結果並びに始めに与えられた流速分布との差、 du 、 dv の分布を Fig. 4に示す。Fig. 4の右側は沈降開始の流速センサーの初期温度が表面水温よりも 5°C 高い場合で、左側の例はセンサー初期温度と表面水温が等しい場合である。明らかに沈降開始時のセンサー温度が表面水温に十分なじんんでいる場合は $\pm 0.5 \text{ cm/s}$ 以下の誤差で流速分布が

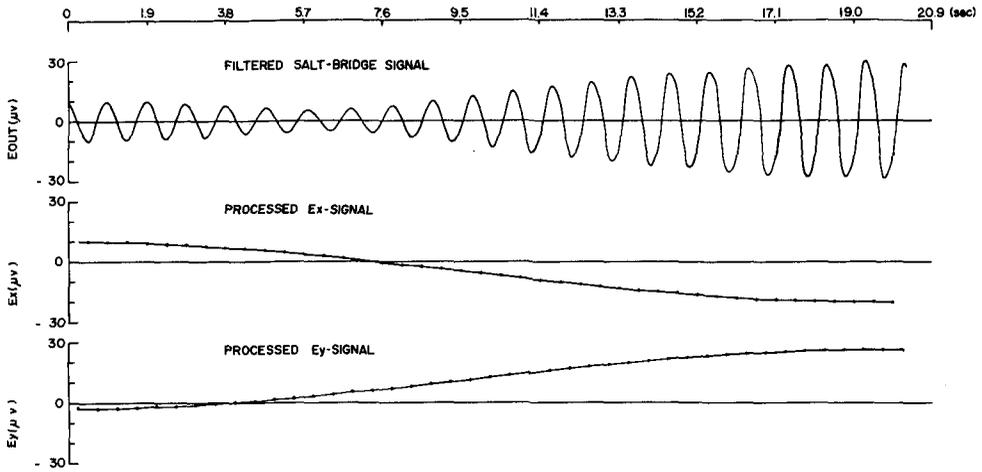


Fig. 3. Simulated velocity sensor output (top), and the processed signals correspond to the given velocity profiles (middle and bottom).

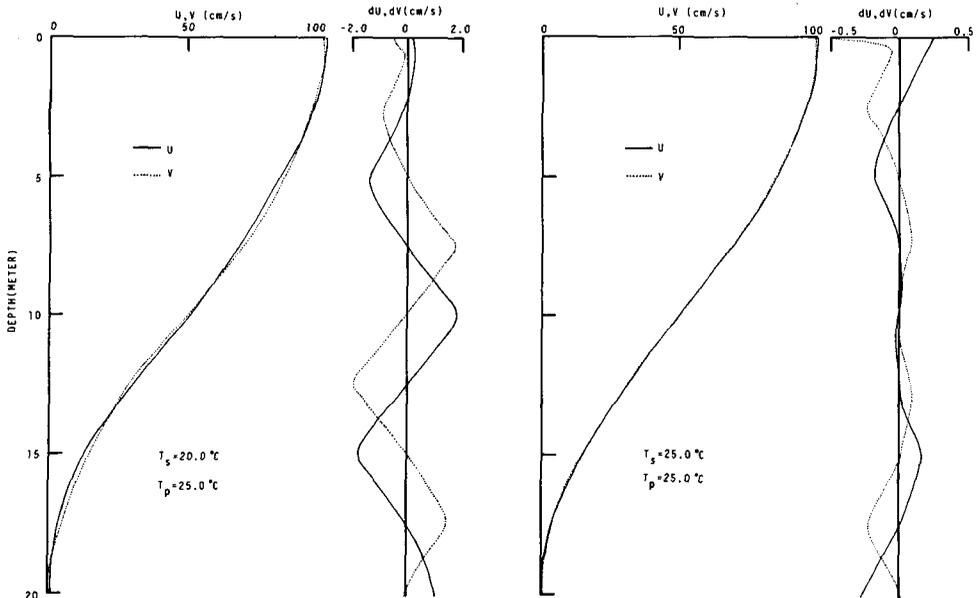


Fig. 4. Reconstructed velocity profiles, and differences between the given profiles and reconstructed ones obtained from the system simulation.

再現され、途中の水温躍層による温度変化の影響はほとんど見られない。

これまでに述べてきたいくつかの基本的問題点の検討を経て、SEMVPの基本設計・試作が行なわれた。Fig. 5は試作されたSEMVPの内部のデータ収録部を除いたデータ変換処理系のブロック図であるが、流速センサー (Salt water bridge) の出力は帯域フィルター通過後増幅され、フラックスゲート型のコンパスのゼロクロスシグナルのトリガーによってサンプルされ、同時に、コンパスの2成分信号の和の正負によって信号反転の判定が行なわれて12ビットのデジタル信号に変換される。一方、流速換算に必要な沈降速度は圧力変換器出力変化とタイマーによって計

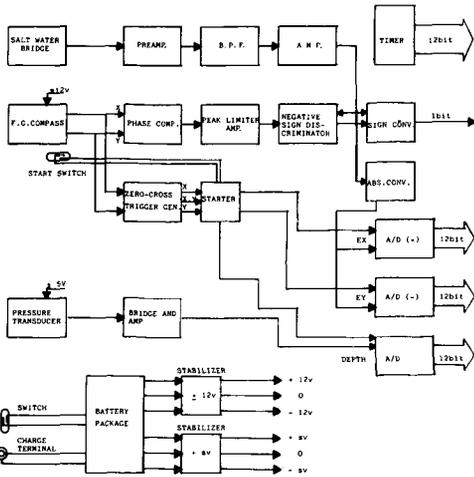


Fig. 5. Circuit block diagram of the SEMVP electronics.

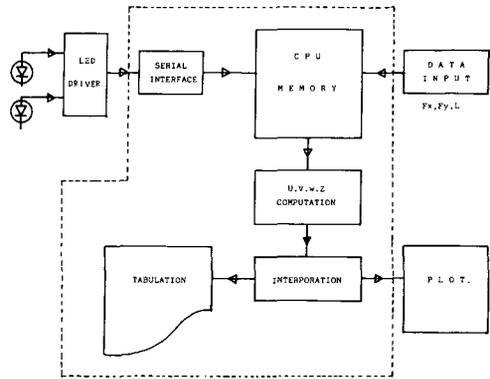


Fig. 6. Block diagram of the data processing system for the SEMVP.

算されるが、これらはいずれも 12 ビット信号として 32 キロバイトの IC メモリーに収録される。

メモリー内容は SEMVP 回収後に光学カップラーにより読み出され、Fig. 6 に示すようなマイクロプロセッサシステムにより処理され、流速分布の作表及び作図が行なわれる。

V. SEMVP の運動特性

SEMVP のインストゥルメントカプセルには直径 13 インチの耐圧ガラス球 (ベントス, 2040-13 v) が用いられたが、カプセルに自転を与えるための翼のサイズ及び翼角を決定する必要があった。このために、直径 13 インチのプラスチック球の周りに幅 8 cm、長さ 20 cm の矩形薄板翼を 4 枚取り付け、更に球体中央を貫通する廻転軸を定流速廻流水槽中に水平に取り付けて、種々の流速に対する翼角と廻転速度の関係を実験的に調べた。ここで、翼角 θ を水平面に対する翼面の

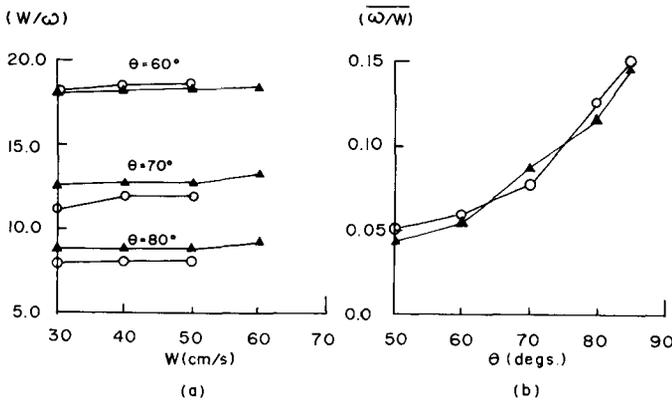


Fig. 7. (ω/w) response characteristics of the dummy SEMVP ; with velocity sensor arm (\blacktriangle) ; without velocity sensor arm (\circ). (a) (w/ω) v.s. w ; (b) (ω/w) v.s. tilt angle of the wings θ .

傾角（沈降による廻転の場合は鉛直軸に対する翼面の傾角となる）と定義すると、廻転角速度 ω と水平流速 w の比は Fig. 7(a), (b)に示すように w には無関係で翼角 θ のみの関数となり、 θ が 90° に近づく程 (ω/w) は大きくなる。

実験は流速センサーに対応する直径 2 cm, 長さ 60 cm のエスロン管を取り付けた場合 (—▲—) と取り付けない場合 (—○—) の両方について行なったが、エスロン管の影響は無視し得る程に小さいことがわかる。

球の廻転は、翼面と θ の角度で流れる流体によって作られる翼揚力が、廻転軸まわりにモーメントを形成することによって生じる。一方球の廻転に伴って球表面にスキンプリクシオンが発生し、これが球の廻転を妨げる方向に作用する。翼の揚力係数を C_L , 球の廻転に起因する球表面の抗力係数を C_s とすると、角速度 ω で廻転する球の角運動量方程式は

$$I \frac{d\omega}{dt} = \frac{n}{\alpha} \rho s r_0 C_L w^2 - 3.35 \rho r_0^5 C_s \omega^2 \quad (10)$$

で与えられる。ここ I は流速センサー及び球の廻転軸まわりの慣性能率で、流速センサーの質量を m_b , 長さを L , 球体の質量を m_s , 半径を r_0 とする時 $I = \frac{m_b}{12} L^2 + \frac{2}{5} m_s r_0^2$ で与えられる。また、 n は翼の枚数、 s は翼面積、 ρ は水の密度である。定常廻転では $(d\omega/dt) = 0$ であるから(10)式より

$$\left(\frac{\omega}{w} \right)^2 = \frac{nsC_L}{6.7r_0^4 C_s} \quad (11)$$

となる。 C_s は翼角に無関係であるから結局、実験結果は C_L が翼角 θ に依存していることを示している。球の廻転による抗力に対して球の周長を代表長にとると $w = 30 \sim 60$ cm/s の流れに対するレイノルズ数は 10^6 のオーダーとなり、この Range の抗力係数は $C_s = 0.0045$ となる。故に、(11) から $\theta = 80^\circ$ に対する C_L を求めると $C_L = 0.048$ を得る。

SEMVP が沈降する際の水中重量を Δm , カプセル球体の半径を r_0 , 廻転翼面積を S とする時、SEMVP の鉛直運動は次式で表わされる。

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\Delta m}{m_t} g - \frac{\rho C'_s}{2m_t} \cdot \{4S \sin \theta + \pi r_0^2\} \cdot w^2 \quad (12)$$

但し、 m_t は SEMVP の全質量、 C'_s は面積 S の翼 4 枚と半径 r_0 の球体が鉛直速度 w で沈降する際に受ける形状抵抗係数である。 $w = 30 \sim 60$ cm/s に対する Re 数は 10^5 のオーダーとなり、この場合の抵抗係数を球の抗力係数で代用すると C'_s は 0.4 となる。

かくして、SEMVP の沈降・廻転特性は(10), (12)式を連立して解くことにより求められる。

翼角 80° , 全質量 14.4 kg, 水中量 1.4 kg の時沈降終速度は約 50 cm/s, この時の廻転角速度は毎秒約 1 廻転となり、ほぼ予想通りの性能が得られる。但し、実際に試作された翼は形状、面積ともに水槽実験時のものと異なり、また SEMVP の全重量も実験用ダミーから若干変更せざるを得なかったため、正確な特性は、後述の須磨海岸での予備実験のデータ（金成, 1982）を用いて決定された。

自由落下に基づく流速測定では、SEMVPのカプセルが周囲流体と全く同一の運動をするという仮定に立っているが、そのためには、カプセル球体が違った流速の層に達する毎に迅速にその層の流速になじむことが要請される。球体が水平流速 $u(z)$ の分布の流れの中を w の沈降速度で降下する時、深度 z における球体の水平速度を $u_s(z)$ とすると、球体は $\{u(z) - u_s(z)\} |u(z) - u_s(z)|$ に比例した抗力 ($u - u_s > 0$ の時は駆動力) を周囲流体から受ける。球体の質量を m_s 、水平加速度を $du_s(z)/dt$ で表わすと球体の水平運動は

$$m_s \frac{du_s(z)}{dt} = \frac{1}{2} \rho A C_s'' \cdot \{u(z) - u_s(z)\} |u(z) - u_s(z)| \tag{13}$$

で表わされる。沈降速度 w が一定ならば、沈降距離 z は $z = wt$ であるから、 $(d/dt) = w(d/dz)$ の変換によって(13)の左辺を z に関する微分で置き換えることができる。したがって、速度差を $u'(z) = u(z) - u_s(z)$ とおくと、(13)式は次のように書ける。

$$\frac{du'}{dz} = \frac{du}{dz} - \frac{\rho A C_s''}{2m_s w} u' |u'| \tag{14}$$

ここに、 A は球体の水平流速に対する有効断面積、 C_s'' は抗力係数、 ρ は水の密度である。1例として、Fig. 8(a)に示す様な、特定の層内で一定のシアが存在し、その層の上、下ではシアが極めて小さい流速場を考える。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dz} = a = \text{const} ; h_1 \leq z \leq h_2 \\ \frac{du}{dz} = 0 ; 0 < z < h_1, h_2 < z \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

で表わされる流速場を球体が一定沈降速度 w で沈降する場合、(14)式の絶対値 $|u'|$ は $z = h_1$ の近傍で最大になる (Fig. 8(b))。この最大値を

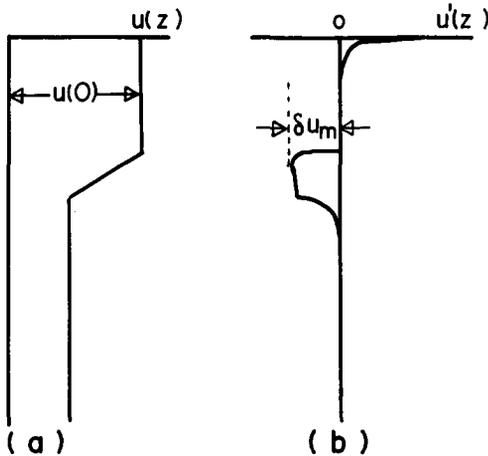


Fig. 8. Drifting response of the SEMVP (b), falling through a sheared velocity field (a).

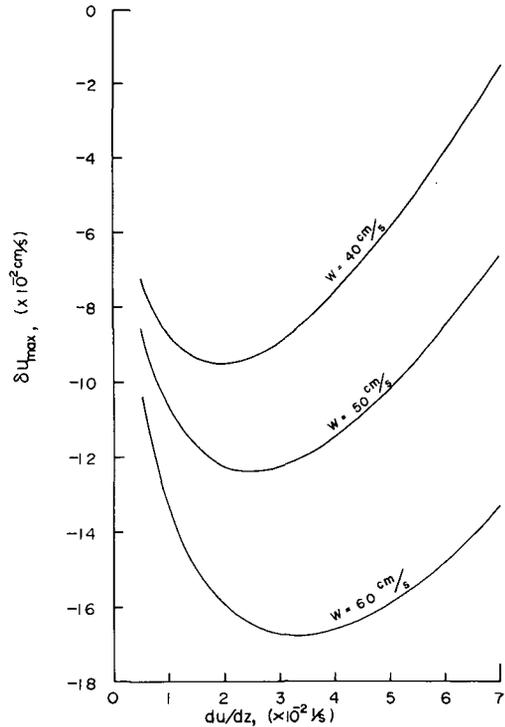


Fig. 9. Estimated velocity difference between drifting SEMVP and sheared horizontal flow.

δu_{max} で表わすと、 $w = 40, 50$ 及び 60 cm/s の各々の場合に、種々の流速シアに対する δu_{max} は Fig. 9 に示すような特性となる。すなわち、特定のシアで $|\delta u_{max}|$ は極大となり、それより小さなシアでは、シアの増大と共に $|\delta u_{max}|$ は大きくなるが、シアが特定値を超えると、シアの増大と共に逆に駆動力が有効に働き周囲流体と球体の速度差を小さくする。いずれにしても、所定の沈降速度の範囲では速度差の最大は 1 cm/s を超えることはなく、球体カプセルは常に周囲流体と共に移動するという仮定が十分な精度で満たされていると考えてよい。

VI. 自動浮上機構

SEMVP の浮上は、カプセル球体下部に取り付けられているボトム・コンタクトリリース (B.C.R) 機構によって行なわれる。SEMVP 自身は本来正の浮力を持っているが、Fig. 10 に示すように、スイベルを介して B.C.R 機構に装着されたふたつの重錘 w_1, w_2 によって負の浮力を与えられて沈降する。Fig. 10 (a) は w_1, w_2 の装着状態を示したもので、 w_2 上部のホルダーリングは、 w_1 を吊下している張力索が懸けられたフックのモーメントによってピークにしっかりと銜えられている。 w_2 に比べて w_1 の重量が大きいので、 w_1 を吊下している張力索が弛まない限り w_2 のホルダーリングがピークから外れることはない。Fig. 10 (b) 及び Fig. 10 (c) は w_1 が海底に着底し、B.C.R 機構が重錘 w_1, w_2 から解放される過程を示したものである。B.C.R 機構は SEMVP 球体と共に w で沈降を続けている時、先端の w_1 が海底に接すると w_1 の張力索の張力が消失する。この間、B.C.R は SEMVP 球体の慣性により沈降を続けるが、張力消失と同時にフックのモーメントもなくなり、 w_2 のホルダーリングがピークから外れる (Fig. 10 (b))。この時点で SEMVP 球体は正の浮力を獲得し、沈降から上昇に転じ、同時にフックが廻転軸 C の周りで廻転して w_1 の張力索も外れ (Fig. 10 (c))、SEMVP は完全に重錘から解放されて浮上する。

B.C.R 機構は何度かのフィールド実験によって確実に機能することが確認されているが、不慮の事態を考慮して w_1 の張力索の途中は厚さ 0.24 mm 、幅 3.2 mm のマグネシウム全属のリボンを介して連結してある。実験により、このマグネシウムリボンは 35% 前後の海水の中では約 1.5 時間で溶解する。したがって、 w_1 の着底によって B.C.R がうまく働かない場合でも 1.5 時間後にはマグネシウムリボンが溶解し、自動的に重錘の切り離しが行なわれる。

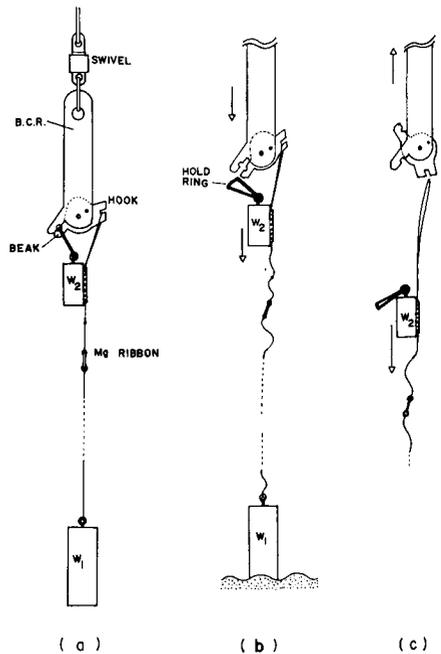


Fig. 10. Bottom contact release (a), and schematics of release process (b) and (c).

VII. 浅海域で予備実験

57年8月にA.D変換並びにデータ収録系を除くSEMVPシステムがいきあがったので、アナログテープレコーダを代用した予備実験を行なった。この実験は須磨海岸沖の水深7mの地点で行なわれた。但し、安全を期して、沈降用着底重錘はFig. 11に示すようにカプセル下端から約2.5m下に吊下したので実効沈降距離は4m弱にすぎない。

測定要素は方位計出力のうち東西成分 (E_{mx}) のみとし、また、流速センサー出力はフィルター及び増幅器通過後の、廻転に伴うA.C成分をそのままカセット磁気テープに記録し、SEMVPの浮上回収後にペンレコーダ上に記録再生するという方法をとった。

Fig. 12は再生された記録の一例であるが、上段は方位計の東西成分 (E_{mx}) で、沈降に伴うSEMVPの自転経過が正弦波状の方位信号となって現われている。記録の右端が沈降開始点で、中央部の▲印のところで重錘が着底し、錘りの解放によってSEMVPが浮上に転ずるために方位変化は沈降時と逆の経過を辿る。Fig. 12の下段は同時に記録された流速センサー出力信号で、沈降時の波形にはわずかに歪みがみられるが、浮上時のものは非常にきれいな波形が得られている。

記録データの解析手法は、完成後にデータ処理系内で行なわれる方式に従った。但し、データはペンレコーダ記録を読みとったものを用いたので、時間軸上で±0.1 sec程度の誤差が含まれる。

SEMVPの沈降開始から海面浮上までの時間は32秒で、実効沈降距離4mとして平均の沈降速度を求めると $w=25$ cm/sが得られる。また実験地点の磁場強度を明石の磁場強度で代用すると、 $F_z=0.355$ ガウス、 $F_y=0.315$ ガウスとなる。以上の値によって $z=3.75$ mを基準として求めた測得流速分布をFig. 13に示す。流速プロファイル中の(—○—)印は、読みとり誤差に起因する流速誤差の程度を表わしているが、A.D変換系完成後にはほとんどこの

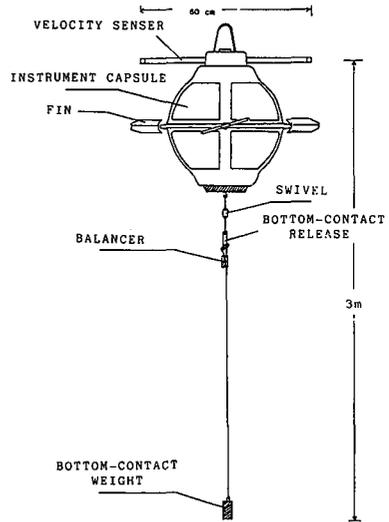


Fig. 11. Plan view of the SEMVP.

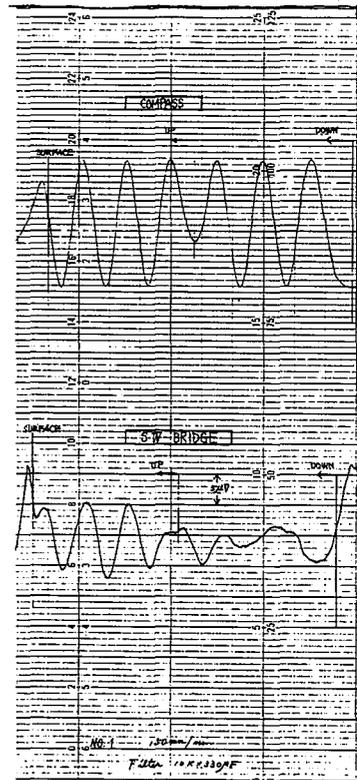


Fig. 12. Playbacked analogue records of the flux-gate compass output (top) and the velocity sensor output (bottom).

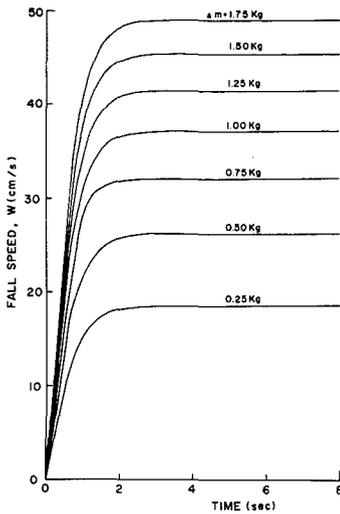


Fig. 13 Determined vertical profiles of horizontal velocity components.

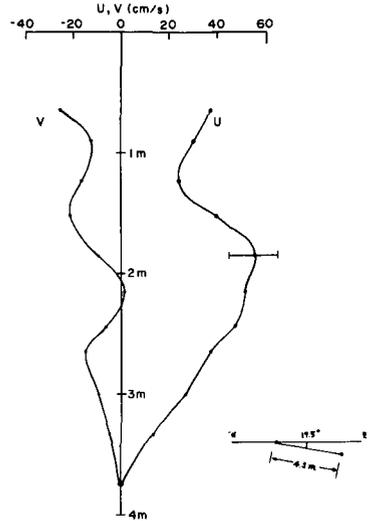


Fig. 14 Excess weight v.s, fall speed response calculated from eq. (12) with newly determined drag coefficients.

誤差は消失する。

実験時は比較的うねりが高く、実験船の航走状況からかなり強い流れの存在が予想された。プロファイルにみられる変動は、こうしたうねりの影響を反映しているものと思われ、また数10cm/sの流速も実況をよく反映しているように思われる。ちなみに、測得流速分布をSEMVPの往復時間で積分して水平変位距離を求めると、Fig. 13の右下に示すように、東西線から南に17.5°の方向へ4.3 m移動したことになる。実験時の沈降開始地点から浮上・回収地点の位置関係とよく一致する。

予備実験記録データをもとに、試作SEMVPの沈降、廻転特性の決定を試みた。特性決定に用いたデータは沈降終速度、及び定常廻転角速度のふたつであるが、これは記録の解析から $w = 26$ cm/s, $\omega = 1.05$ rad/sの値が得られている。従って、(10), (12)式で定常状態を考えると、

$$\left[\frac{\Delta m \cdot g}{\rho \left(2S + \frac{\pi r_0^2}{2} \right) C_D} \right] = (26.0)^2$$

及び

$$\sqrt{\frac{2S r_0 C_L}{3.35 r_0^2 C_s}} = 0.04$$

が得られ、翼面積 $S = 234$ cm², $\Delta m = 0.5$ kgについて C_D, C_L を求めると、 $C_D = 0.8, C_L = 0.00387$ を得る。以上の係数をもとに、(12)式を用いて種々の水中重量 Δm に対する沈降速度の時間変化を求めた結果を Fig. 14 に示す。また、Fig. 15 は予備実験時の沈降速度曲線 ($\Delta m = 0.5$ kg の特性) に対する自転応答を(10), (12)式の連立によって求めたものであるが、予備実験

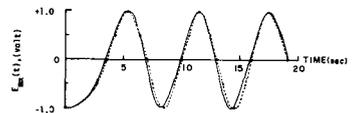


Fig. 15. Evolution of rotation of the SEMVP obtained from the field experiment (dotted line) and theoretical response estimated from eq. (10) and eq. (12) with newly determined drag coefficients (solid line).

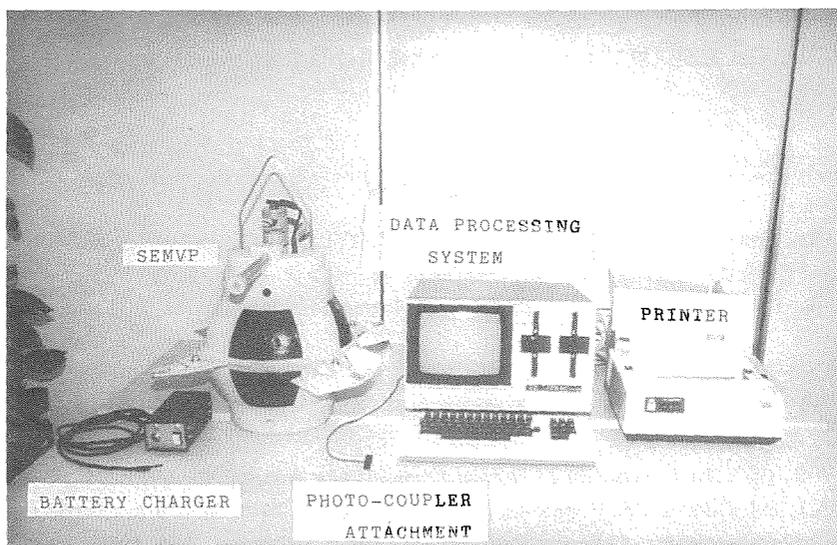


Fig. 16. View of the SEMVP and the processing system.

の方位計出力 (…●…) と極めてよく一致していることがわかる。この結果は、実際に試作された SEMVP の翼が、基礎実験におけるダミー球体の翼に比べて揚力が若干小さくなっていることを示している。基礎実験では沈降速度 50 cm/s で毎秒 1 回転の角速度が得られたが、試作された SEMVP の若干の重量増と翼型の変更によって実際は (2 rad/s) / (50 cm/s) 程度となった。

VIII. む す び

56 年度から、浅海での応用を目的とした自由落下型電磁式流速プロファイラー (SEMVP) の基礎実験並びに試作を行ってきたが、57 年 12 月に Fig. 16 に示すようなシステムが完成し 58 年 3 月に行なわれる現場実験に向けて細部の調整が進められている。

すでに述べたように、このシステムの成否は流速センサーの大きな温度ドリフトを如何にして抑えるかにかかっている。特に、設計頭初は高々数マイクロボルトの流速信号を数 10 ミリボルトの擾乱から分離して効率よく増幅し得るかどうかに若干不安があったが、スーパー・ローノイズの IC オペアンプを使用することによって不安は解消された。

これまでの基礎的な検討結果からみて、局所的な地球磁場強度が 1000 ガンマのオーダーの精度で与えられれば、少くとも ± 5 cm/s 程度の精度は期待できるものと思われるが、実際の測定精度は 58 年 3 月に予定されている現場実験の結果によって評価せざるを得ない。

謝辞 この研究を進めるにあたり、文献並びに各種情報集収の面で東京大学海洋研究所の平啓介助教授にいろいろ御助力をいただいた。また、SEMVP のダミーモデル実験は、函館製鋼船具株式会社の垂直循環型大型回流水槽を使わせていただくと共に、実験に際しては同社研究開発部のスタッフ各位に種々の便宜を計っていただいた。ここに併せて心より謝意を表します。

この研究の一部は、昭和 56 年度及び昭和 57 年度、文部省科学研究費補助金特定研究(2)、研究課題「浅海用電磁式流速プロファイラーの開発と応用に関する基礎的研究」によって行なわれたものである。

文 献

- 金成誠一, 1982, Free-Fall 型電磁式流速プロファイラー (EMVP) —— 浅海域における予備実験について ——, 文部省科学研究費補助金特定研究, 海洋の動的構造ニュースレター, No. 9, 3-5.
- 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.
- VON ARX, W.S., 1962, *An introduction to physical Oceanography*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1-422.
- WILLIAMS, A.J., R.J. JAFFEE, P.E. PORANSKI, and P.J. SIMONETTI, 1972, Short arm electric field measurements of ocean currents, *Technical Rept., Woods Hole Oceanographic Inst.*, WHOI-72-13, 1-78.