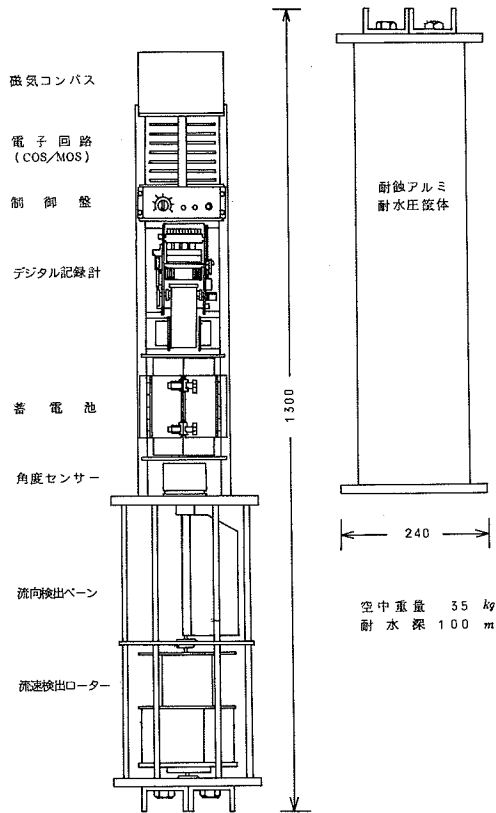


に製作、連続作動試験、温度試験等を積み重ねて、充分満足する結果を得、さらに雑音については電子部品の高い雑音余裕度が機器動作の安定度を増すという利点をも得た。

この流向流速計は現在開発されたばかりであり、今後、いろいろな条件を持つ海で多くの試練を積み重ね、流れの調査に多少なりとも役立てるよう努力したいと考えている。



第3図 デジタル記録内装型流向流速計

6. 超音波（シング・アラウンド型）流速計について

鷺見 栄一（工業技術院公害資源研究所）

1. ま え が き

海洋の中でも、特に沿岸海域や Estuary での物質輸送機構を解明することは、現在において非常に重要な課題であると思われる。しかし、輸送機構において支配的な要因である流れの実体を表わ

す流体力学量の知識は非常に乏しい。そのような観点から製作した二層型超音波流速計について報告する。

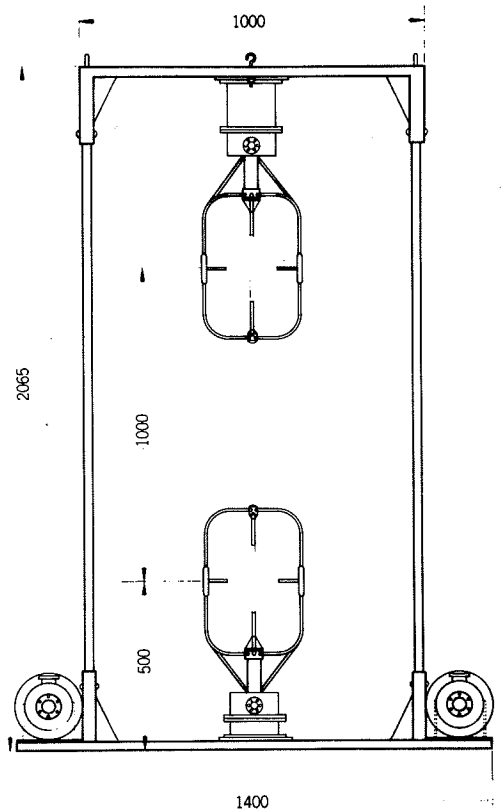
2. 二層型超音波流速計

海洋での流れの場を微細な構造という意味で観測した例は非常に少ないが、Grant等の熱膜流速計の観測¹⁾、Bowdenによる電磁流速計の観測²⁾、Wiseman³⁾およびSeitz⁴⁾のドップラー式流速計の観測等にその例がみられる。

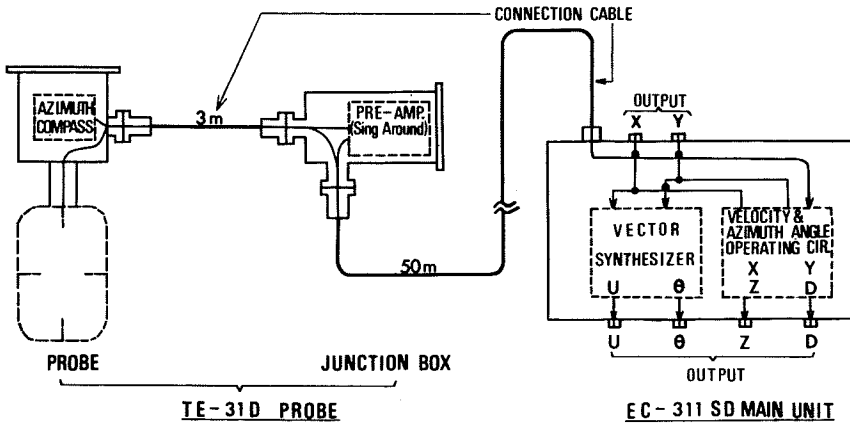
海洋、特にEstuaryでは、流れは非定常であり、微小な流速においても有効性を発揮し、三方向を同時に測定できる流速計が必要とされる。現在、それらの条件を満たす流速計は超音波流速計しかないと思われる。

超音波流速計には種々の方式がある。大別すると、(1)パルス時間差方式、(2)位相差方式、(3)シングア라운드方式の三つがある。海洋において、多く用いられているのは、パルス時間差方式(ドップラー方式)である。しかし、この方式は原理的な難点を現実の海洋において持つ。ひとつは、散乱粒子(scatter)を期待しなければならず、現実の海洋においては、懸濁物質(suspended matter)である。低濃度(数 mg/l)であると測定不可能になる場合がある。又、流速への換算公式に水中の音速Cが入っているため、海洋のように温度や塩分の変化の激しい流れには換算が複雑になる。

海洋のような非定常な流れの場の鉛直構造を把握するには多くの測点における同時測定が必要である。ここでは、最低に必要な二層の測流ということから、二層型流速計とし、ひとつを海底から50cmに、他を150cmに三方向型のプローブを取りつけた。方式は、シング・アラウンド方式である。第1図に二層型流速計の正面図、第2図に簡単なブロックダイアグラムを示す。



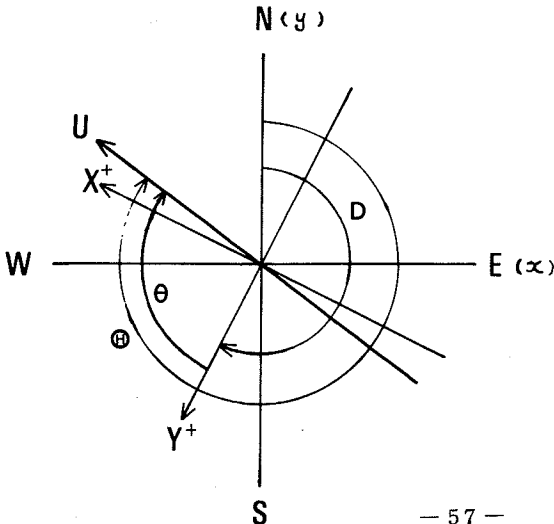
第1図 二層型流速計 (単位……mm)



第2図 ブロック・ダイアグラム

シング・アラウンド方式とは、超音波パルスが、流れ方向とその逆の方向とでは、伝播速度が違っている原理を利用した方式であり、伝播時間の逆数である周波数（シング・アラウンド周波数）の差より流速を求めるものである。換算公式の中に、水中の音速Cが入っていないことは、海洋のように温度や塩分の変化の激しい流れには最適であると思われる。

流速測定は、三方向を1/3秒ずつ測定し、それを1秒に平均化して出力する。上部のプロープには方位計が内蔵されており、流速計自体の磁方位（D）を検出する。出力は、X、Y、Zの三方向の出力と、ベクトル合成回路を通して、U、 θ の極座標で出力することもできる。研究目的にもよるが、極座標で出力する方が、解析に便利である。ここで、主流方向（ \oplus ）を定義する。厳密な意味の座標系を決めることができないので、現段階では流速計を海底上に設置した状態の流速計の座標系を使うことにする。非定常流における擬似定常性を評価するのは困難な問題であるが、統計解析を力学的に意義あるものにするために、定常性があると思われる期間について行なう。N秒間の測定をすると、Dはその測定時内では一定であるので、磁北（N）に対する流向（ \oplus ）は、第3図より、



第3図 座標系（プローブを上から見て） Y^+ は防水接続コネクタを示す。

$$H_i = \theta_i + D \quad (i=1, N) \quad (5)$$

地球座標系(x, y平面)に投影し、ベクトル的な“重み”を考慮すると、

$$\bar{U}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \sin \Theta_i \quad (6)$$

$$\bar{U}_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \cos \Theta_i \quad (7)$$

である。主流の流速(\bar{U})と流向($\bar{\Theta}$)は、

$$\bar{U} = \sqrt{\bar{U}_x^2 + \bar{U}_y^2} \quad (8)$$

$$\bar{\Theta} = \tan^{-1} \frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_y} \quad (9)$$

になる。次に、主流に対する変動成分を、流れ方向(longitudinal)の成分を u_i 、横方向(lateral)の成分を v_i とすると、

$$u_i = U_i \cos(\Theta_i - \bar{\Theta}) - \bar{U} \quad (i=1, N) \quad (10)$$

$$v_i = U_i \sin(\Theta_i - \bar{\Theta}) \quad (i=1, N) \quad (11)$$

である。又、Z方向については単純に平均値 \bar{W} と変動成分 w_i を次のように定義する。

$$\bar{W} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \quad (i=1, N) \quad (12)$$

$$w_i = W_i - \bar{W} \quad (i=1, N) \quad (13)$$

海底面より上向きに(+)とする。ただし、プローブの設置方向は、流速計感部が下側にある時である。第1図のような二層型流速計の場合には、上層の流速計は上記の座標であるが、下層については、 Y^+ が一致されてあるので、X、Zは反対の方向の出力になる。

しかし、主流方向や“vertical”の方向についての考え方が定まっているわけではない。Wisemanは、“vertical”の考え方として特に次の諸点について指摘している。

- (1) 重力の方向
- (2) 密度勾配の方向
- (3) (1)と(2)の組み合わせ
- (4) 平均シャーの影響

(5) “local concept”でよいのか。空間的あるいは時間的な変化についてはどうか。

これらは、海洋の流れについて基本的な問題があることを言っている。すなわち、「流れの方向とは何か」ひいては「流れとは何か」という基本的な命題に帰着していくと思われる。現在、二層型超音波流速計に電気式傾度計を取付けることを考察中であるが、Wisemanに答えられるかどうかの展望はない。

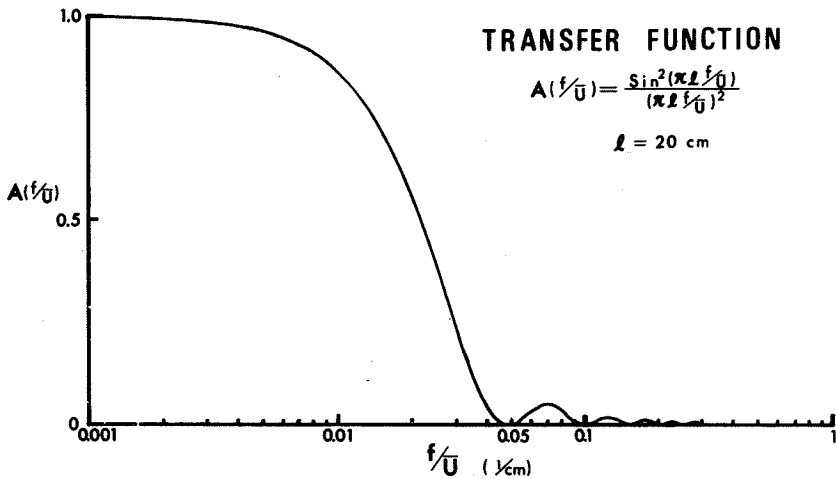
又、本流速計のような型の場合に、微小な流れに適するかどうかが問題になる。原理的に、スパン長さ(ℓ)によるフィルター効果がある。このような空間的な平均化を次のような単純移動型の伝達関数で評価する⁵⁾。

$$A(f) = \frac{\sin^2(\pi s f)}{(\pi s f)^2} \quad (14)$$

(14)式によって、スペクトルの高周波切断が生じる。Sはスパン長さ(ℓ)による平均化時間であり、Taylorの“frozen turbulence”の仮定より、 $S = \ell / \bar{U}$ とする。(14)式は、

$$A(f/\bar{U}) = \frac{\sin^2(\pi \ell f/\bar{U})}{(\pi \ell f/\bar{U})^2} \quad (15)$$

となる。ℓ = 20 cmであるので、伝達関数は f/\bar{U} をパラメーターとして、第4図になる。



第4図 伝達関数

$f/\bar{U} = 0.05$ で $A(f/\bar{U}) = 0$ であるので、各流速条件に対応した f_c が決まり、これ以上の高周波数側はまったく信頼性がないという目安になる。しかし、運動量輸送に関しては寄与する乱れはかなり低周波が大部分であり、統計解析から導かれる乱れの統計量は信頼性が高いと思われる。

3. 観測例

代表的な例について、乱れの統計量に関して第1表に示す。1973年10月9日に観測した岡山湾での下げ潮、(RUN 01-E11)と上げ潮(RUN 01-F17)の例である。これらの諸結果から推論される海底附近の乱流構造を列記すると、

(1) エネルギーのレベルは、 $u > v > w$ の順位で分布している。

(2) 各成分の乱れの強さ(\bar{u}^2 、 \bar{v}^2 、 \bar{w}^2)より、海底上の流れは非常に扁平化された異方性(anisotropic)の流れである。

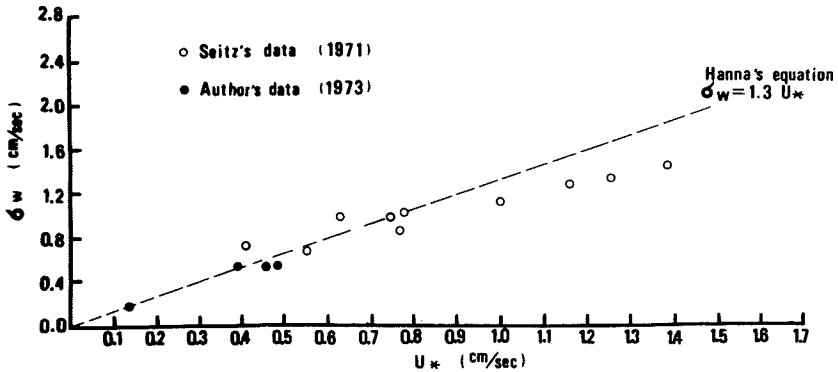
(3) "Constant Stress Layer" (摩擦速度 U_*)が一定である。

(4) 第5図より大気における接地気層と乱流構造は類似している。

表1表 乱れ特性

	\bar{w}	\bar{U}	θ	\bar{u}^2	\bar{v}^2	\bar{w}^2	$\bar{q}^2 = \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2$
RUN 01-E11(cm/sec)(cm/sec) (°)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)
Z=1.5m	0.3	15.4	175	1.82	0.37	0.21	2.40
Z=0.5m	0.1	11.1	119	1.46	0.34	0.21	2.01
	\overline{uw}	\overline{uv}	\overline{vw}	\overline{uw}	\overline{vw}	\overline{uw}	u_*
	(cm ² /sec)	(cm ² /sec)	(cm ² /sec)	$\sqrt{\frac{\overline{uw}}{\overline{u^2}}}$	$\sqrt{\frac{\overline{vw}}{\overline{v^2}}}$	(cm ² /sec)	(cm ² /sec)
Z=1.5m	0.0498	0.1711	-0.0017	0.0711	0.1213	0.7661	-----
Z=0.5m	-0.1528	0.1700	-0.0077	-0.0255	-0.1194	-1.7021	0.39

	\bar{w}	\bar{U}	θ	\bar{u}^2	\bar{v}^2	\bar{w}^2	$\bar{q}^2 = \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2$
RUN 01-F17(cm/sec)(cm/sec) (°)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)	(cm ² /sec ²)
Z=1.5m	-0.4	10.6	353	1.87	0.80	0.29	2.96
Z=0.5m	-0.1	8.6	299	2.90	0.47	0.23	3.60
	\overline{uw}	\overline{uv}	\overline{vw}	\overline{uw}	\overline{vw}	\overline{uw}	u_*
	(cm ² /sec)	(cm ² /sec)	(cm ² /sec)	$\sqrt{\frac{\overline{uw}}{\overline{u^2}}}$	$\sqrt{\frac{\overline{vw}}{\overline{v^2}}}$	(cm ² /sec)	(cm ² /sec)
Z=1.5m	-0.2382	-0.5829	0.1995	-0.3392	0.4042	-2.5269	0.49
Z=0.5m	-0.2090	0.1973	-0.0188	-0.0979	-0.0237	-1.7969	0.46



第5図 海洋と大気との乱流構造の類似関係
Hannaの式⁶⁾は中立状態の接地気層についての経験式
著者のデータは東京湾でのデータを含む

4. 結 び

種々の問題点を含むにしろ、現実の海洋での三方向流速計から得られる情報は、海洋の諸現象を理解する上で重要な武器になると思われる。たゞし、その利点を有効に生かしているかどうかである。

参 考 文 献

(1) Grant, H. L., R. W. Stewart and A. Molliet (1962): Turbulence

- spectra from a tidal channel. *J. Fluid Mech.*, Vol. 12, No. 2, p. 241.
- (2) Bowden, K. F. (1962): Measurements of turbulence near the sea bed in a tidal current. *J. Geophys. Research*, Vol. 167, No. 8, p. 3181.
 - (3) Wiseman, W. J. (1969): On the structure of high-frequency turbulence in a tidal estuary. Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins Univ., Technical Report 59.
 - (4) Seitz, R. C. (1973): Observations of intermediate and small scale turbulent water motion in a stratified estuary. Part I & II, Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins Univ., Technical Report 79.
 - (5) Ishihara, Y. and S. Yokoshi (1969): Ultrasonic flowmeters for measuring river turbulence. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.*, Vol. 18, part 3, No. 144, p. 49.
 - (6) Hanna, S. R. (1968): A method of estimating vertical eddy transport in the planetary boundary layer using characteristics of the vertical velocity spectrum. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 25, p. 1026.