

東京湾における海底摩擦係数の測定について

市原正史*・橋間元徳**・鷺見栄一***

1. 序 論

海底摩擦係数は、潮流の数値シミュレーションにおいては、一般に、 2.6×10^{-3} という定数が用いられているが、これを現地観測によって確認した例は少ない¹⁾。これは、計器の開発が遅れ、測定が困難であることに大きな原因がある。海底摩擦係数の測定には、モーメントム法、流速分布法、渦相關法(レイノルズ応力法)、プレストンチューブ法などが用いられる。著者の一人は従来より超音波流速計による海底摩擦測定装置の開発を進めてきており、また、海外においても最近同様の計器が開発された。今回、これらの計器を用いて、渦相關法による海底摩擦係数の測定を試み、成果を得たので報告する。

なお、著者の一人は、東京湾における従来の測定から、海底面上数 m の区域は Constant Stress Layer と仮定されることを確認した²⁾。この仮定のもとでは、境界層内一点における流速変動から、渦相關法による海底摩擦係数の測定が可能となる。ここでは、これらの成果を踏まえて測定水深を海底面上 1 m に設定した。

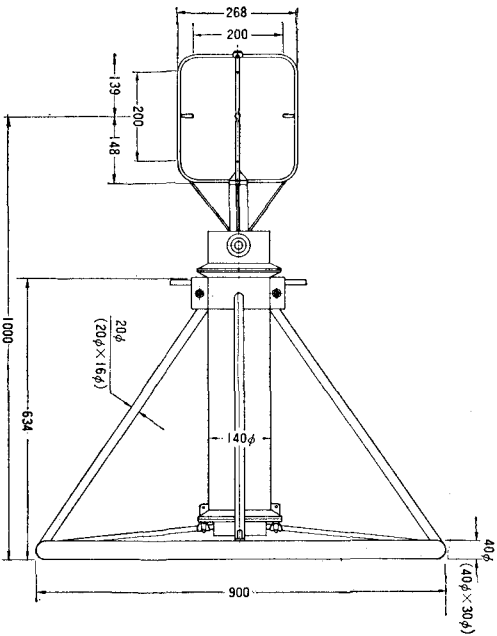
2. 測定の概要

(1) 測定機器

海底附近の流れを測定する流速計としては電磁流速計と超音波流速計が一般的である。水平方向に二次元の流れを測定する場合には双方の計器ともに使われているが、鉛直方向を含んだ三次元の流れを測定するには現在のところでは超音波流速計しかない。また、海域の任意の地点で測定するには、センサー、回路、データ収録装置、電源がひとつに内蔵されているタイプが望ましい。これには低消費電力型の回路やデータ収録装置の開発が必要であり、わが国以外ではアメリカとノールウェイで成功している。内蔵型三次元超音波流速計の代表的なもので、本測定で使用したものについての性能比較を表一に示す。また、その全体図を図一と図二に示

表一 内蔵型三次元超音波流速計の性能比較表

		計 器 1	計 器 2
メーカ		海上電機(株)	クリスチャン・マイケルセン研究所
流速センサー		対向型(X,Y,Z)	反射板型(X,Y) 対向型(Z)
測定方式		時分割送受切換式 シング・アラウンド方式	時間差方式
測定精度		±5 mm/sec	±2 mm/sec
記録装置		Datel カセット・レコーダー	Memodyne カセット・レコーダー
記録容量		2.2×10^6 ビット	2.2×10^6 ビット
記録 時間	連続	300 フィート・テープで 13 時間 (1 秒間隔)	300 フィート・テープで 8 時間 (1 秒間隔)
	離散		1 分毎に m 回 n 秒間隔に設定できる。l=10, m=10 n=2 で 20 日間
電 源		単一型リチウム電池 5 個	単一型リチウム電池 13 個
そ の 他		方位計, 傾斜計 付属	方位計, 気泡式水準計, サーミスター付属
備 考		第 1 回目の測定に使用	第 2 回目の測定に使用



図一 超音波流速計 (計器 1)

* 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所
** 正会員 工修 運輸省港湾局計画課 (前横浜調査設計事務所)
*** 正会員 工修 工業技術院公害資源研究所

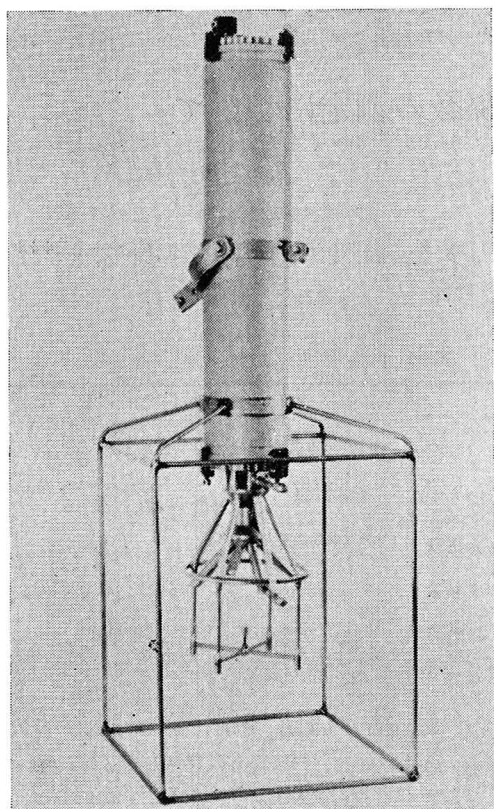


図-2 超音波流速計 (計器 2)

す。海洋では塩分と温度が時間的に変化しているため音速の効果が問題となっている。計器 1 において用いているシングア라운드方式は音速を換算方式の中に入れないことにより³⁾、計器 2 において用いている時間差方式は音速を測定ごとに補正することにより⁴⁾、それぞれ、問題点を解決している。測定可能時間は記録装置やカセットテープにより決まってくるが、両方とも 2 トラック方式のカセットレコーダであり、記録フォーマットにより多少の差がある。

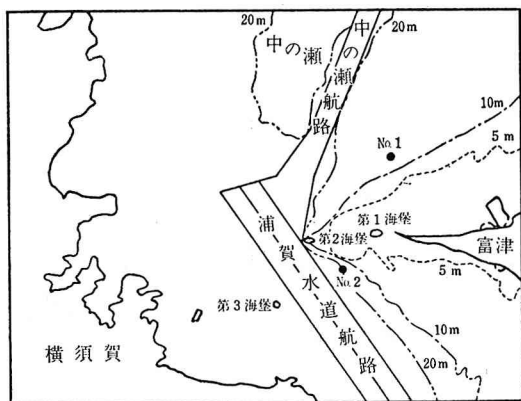


図-3 測定位置図

(2) 測定地点

測定は、東京湾の富津沖 2 点で各 2 回行った。測定位置を図-3 に、測定日時・測定地点の水深および近傍の底質の平均粒径を表-2 に示す。底質はいずれも砂質で

表-2 測定の概要

測 点	測 定 日 時				測 定 地 点 の 中 央 水 深	底 質 の 中 央 粒 径
	第 1 回 目		第 2 回 目			
	年月日	時 分 時 分	年月日	時 分 時 分		
No. 1	54/6/26	7:10～18:00	54/8/10	10:50～17:00	14.5	0.12
No. 2	54/6/25	7:00～18:10	54/8/ 8	9:40～16:40	21.0	0.35

ある。測点 1 は水深 14.5 m と浅く地形的にも平坦な所である。測点 2 は東京湾入口で、幅が狭く水深も 21 m と深い。附近一帯は東京湾の中でも流速が最も速い所である。

(3) 測定データの特性

東京湾は半日周潮型の潮汐流が卓越している。今回の測定においては測定時間が 6~11 時間であるので、いずれも流速最強時を含んでいる。最強流速は、測点 1 では第 1 回目・第 2 回目とも 25 cm/sec、測点 2 では第 1 回目 45 cm/sec、第 2 回目 55 cm/sec となっている。これは、前述のような地形的特性に寄因するようである。

なお、波は湾外 (浜金谷沖) の観測値で、測点 1 の第 1 回目の測定時に有義波高 0.5~1.3 m を記録しているが、他はおおむね 0.5 m 以下である。周期はいずれも 5 sec 前後である。

3. 解析結果

(1) データ処理方法

得られたデータは 6~11 時間にわたる 1 秒ごと 3 方向の流速成分である。今、水平 2 方向および鉛直方向の流速成分を X_i , Y_i , Z_i とすると、主流方向の 10 分間水平平均流速 $\bar{U}$ とその流向 $\bar{\theta}$ は、

$$\bar{U} = \sqrt{\bar{X}_i^2 + \bar{Y}_i^2} \quad (i=1 \sim 600) \quad (1)$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(\bar{X}_i / \bar{Y}_i) \quad (2)$$

となる。次に、主流方向の水平流速を U_i 、鉛直流速を W_i ($W_i = Z_i$)、流向を θ_i とすると、主流方向とその直角方向および鉛直方向の流速変動成分 u_i , v_i , w_i は、

$$u_i = U_i \cos(\theta_i - \bar{\theta}) - \bar{U} \quad (3)$$

$$v_i = U_i \sin(\theta_i - \bar{\theta}) \quad (4)$$

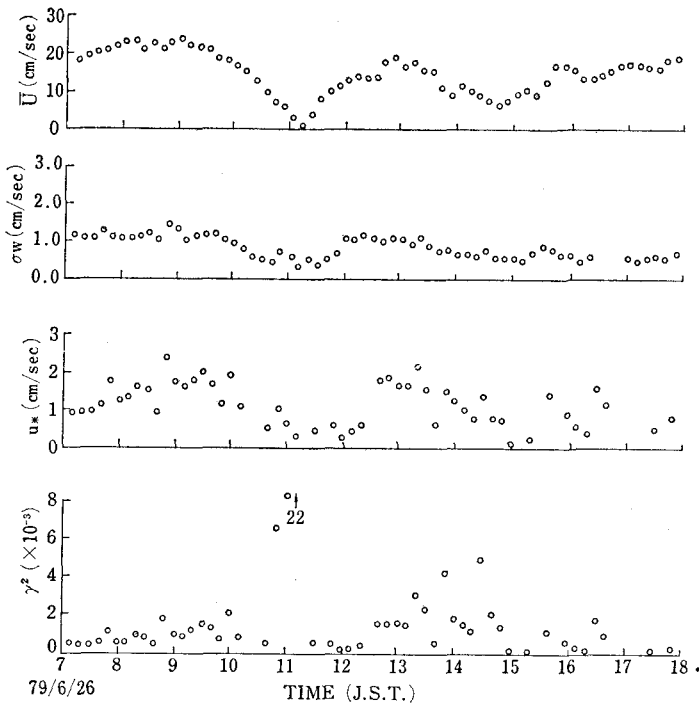
$$w_i = W_i - \bar{W}_i \quad (5)$$

となる。ここに、 $U_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$, $\theta_i = \tan^{-1}(X_i / Y_i)$ である。これらの値から、摩擦速度 u_* 、海底摩擦係数 γ^2 は、

$$u_* = \sqrt{-u_i w_i} \quad (6)$$

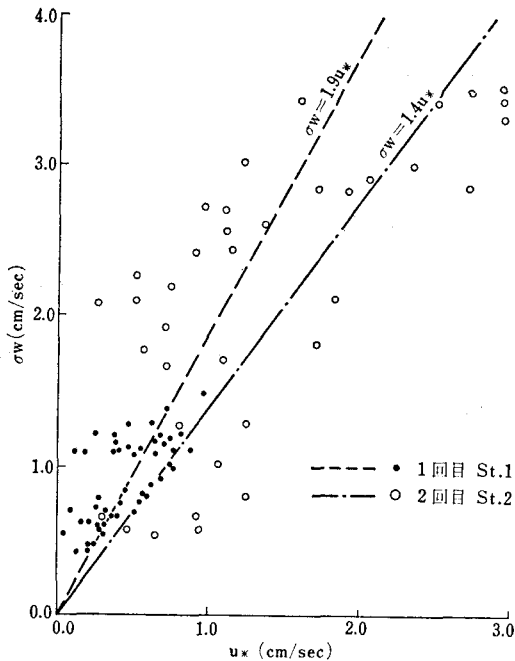
$$\gamma^2 = (u_* / \bar{U})^2 \quad (7)$$

によって算定される。

図-4 $\bar{U}$, σ_w , u_* , γ^2 の経時変化図 (測点 1, 第 1 回目)

(2) 解析結果

図-4 に、主流方向の平均流速 $\bar{U}$ 、鉛直方向の乱れ速度 $\sigma_w (= \sqrt{\bar{w}^2})$ 、摩擦速度 u_* 、摩擦係数 γ^2 の経時変化の一例を示す。 $\bar{U}$ は、若干不連続になる所があるものの半日周潮型の潮汐流が卓越していることを示している。

図-5 $\sigma_w \sim u_*$ 相関図

また、 σ_w , u_* , γ^2 は、ほぼ、 $\bar{U}$ に従って変動している。 $\sigma_w \sim u_*$, $\sigma_w \sim \bar{U}$, $u_* \sim \bar{U}$ の関連をみたのが 図-5, 6, 7 の各図である。また、各測点ごとに、これら諸量の間に線形関係があるとして、平均的に σ_w / U_* , $\sigma_w / \bar{U}$, $u_* / \bar{U}$ を求めてみた結果を表-3 に示す。

σ_w と u_* の関連については線形関係が理論的に仮定されており、大気境界層の場合、Hanna⁵⁾ は $\sigma_w = 1.3u_*$ 、海底境界層の場合、McCave⁶⁾ は $\sigma_w = 1.2u_*$ を与えている。今回の測定においては、表-3 に示す通り線形定数の値は一定ではないが、図-5 に示す通り、各測定データごとについてみれば線形関係の存在はうかがえる。ただし、いずれも Hanna らの値より大きい値となっている。

σ_w と $\bar{U}$ の関係は、Reynolds 数等の影響を受けるから一義的な関係を求めることには問題があるかもしれないが、一定程度の幅を持ちながら線形関係は保ち得ると考えられる。今回の観測データに

ついてみると、図-6 に示すように比較的強い線形関係がうかがえる。線形定数の各測点ごとの値は、表-3 にみる通り比較的安定した値となっている。

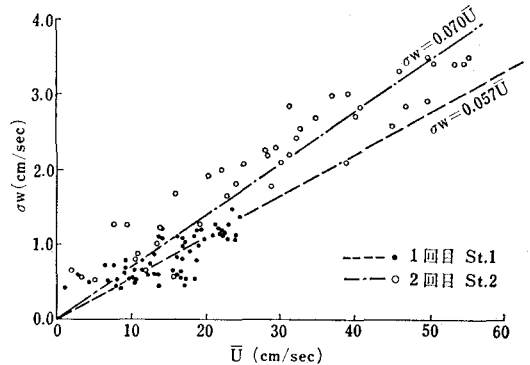
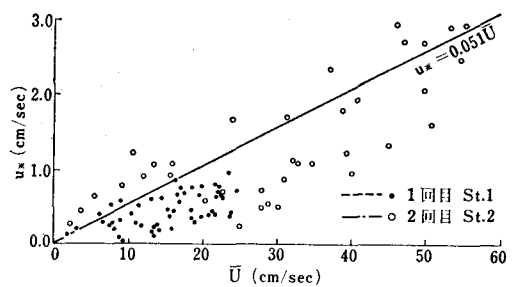
図-6 $\sigma_w \sim \bar{U}$ 相関図図-7 $u_* \sim \bar{U}$ 相関図

表-3 乱れ諸量間の関係

測 点		σ_w/u_*	$\sigma_w/\bar{U}$	γ_0^2	$u_*/\bar{U}$
Na. 1	第1回目	1.9	0.057	0.9×10^{-3}	0.030
	第2回目	1.6	0.057	1.3	0.030
No. 2	第1回目	1.9	0.064	1.1	0.024
	第2回目	1.4	0.070	2.5	0.044

一般に使用される海底摩擦係数 $\gamma^2 = 2.6 \times 10^{-3}$ を (7) 式にあてはめれば

$$u_*/\bar{U} = 0.051 \dots\dots\dots (8)$$

となる。表-3 にみるように $u_*/\bar{U}$ の値はいずれも (8) 式の値より小さい。図-7 をみると式 (8) の直線は測定値の上限包絡線に近く、かつ、 $\bar{U}$ の増大につれてかい離していく。

摩擦係数の平均的な値として線形関係を有する諸量、すなわち、 $\sigma_w/\bar{U}$ と σ_w/u_* の比の自乗として求めてみた結果が表-3 に示す γ_0^2 の値である。バラツキの大きな値が得られているが、いずれも、現在一般に用いられている 2.6×10^{-3} と同程度か、または、それ以下の値となっている。

以上、測定した諸量の評価を通じて摩擦係数の平均的な値について考察したが、厳密には、摩擦係数は流速や底質・海底地形の関数として評価されるべきである。そこで、定義式 (7) により個々に算定された γ^2 の値を $\bar{U}$

に対して表示したのが 図-8 である。おおむね $\bar{U}$ の増大に伴ない γ^2 は指数関数的に減少しており、 $\bar{U}$ が小さい時は 2.6×10^{-3} より大きく、 $\bar{U}$ が大きい時はその近傍またはそれより小さくなっている。これは、この測点が力学的に滑面であることを示している。表-3 に示した γ_0^2 の値は諸量間における線形関係をもとにして求めたものであり、この場合には、 γ_0^2 は $\bar{U}$ が大きい場合のデータの影響を強く受けるから 2.6×10^{-3} より小さくなったものと考えられる。図-8 からわかるように、1 回の測定によるデータは一つの曲線に載っているようであるが、各測定間のデータについては必ずしもそうは言えない。これは、摩擦係数が、流速のみならず底質や海底地形の影響を受けていることを予想させるものであるが、今回はそこまでの解析はできなかった。さらにデータを集積する必要がある。

4. 結 論

今回の測定によって得られた主な結論は以下の通りである。

- ① 2 種類の計器を用いて、2 測点において、2 回異なる時点で測定を行った結果、いずれのデータでも $\sigma_w \sim u_*$ 、 $\sigma_w \sim \bar{U}$ については線形関係が存在した。
- ② $\sigma_w \sim u_*$ と $\sigma_w \sim \bar{U}$ の平均的な関係より求めた γ_0^2 は、一部のデータを除いて、一般的に潮流計算において用いている 2.6×10^{-3} と同程度かそれ以下の値となった。
- ③ 個々の測定値から求めた摩擦係数 γ^2 の値は平均流速 $\bar{U}$ の増大とともに減少する傾向を示している。

終わりに、報告のとりまとめにあたっては、運輸省港湾技術研究所海水汚染水理研究室の小笹室長に御指導いただいた。ここに、深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Kagan, B. A.: Sea-bed friction in one-dimensional tidal current, Izv. Atmospheric and Oceanic Physics, Vol. 7, No. 11, pp. 1190~1200, 1971.
- 2) 鷺見栄一: エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構 (2), 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 195~199, 1976.
- 3) 2) と同じ。
- 4) Gytte, T.: CMI recording oceanographic instrument-Model HCM-2: user's technical manual, CHR. Michelsen Institute, Bergen, Norway, Ref. CMI No. 77041-1, 1977.
- 5) Hanna, S. R.: A method of estimating vertical eddy transport in the planetary boundary layer using characteristics of the vertical velocity spectrum, J. Atmos. Sci., Vol. 25, pp. 1026~1033, 1968.
- 6) McCave, I. N.: Sand waves in the North Sea off the coast of Holland, Marine Geol., Vol. 10, pp. 199~225, 1971.

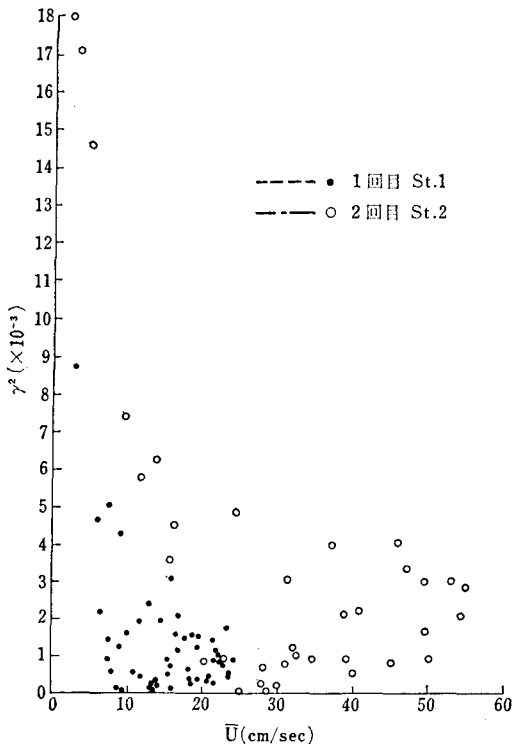


図-8 $\gamma^2 \sim \bar{U}$ の関係図