

## 大村湾の流動および拡散に関する研究

## (第1報：研究の概要と水理模型)

栗須正登\*・中村武弘\*\*

田中清裕\*

Studies on Flow and Diffusion in the Ōmura Bay

(1) Synopsis of this studies and hydraulic model

by

Masato KURISU

(Department of Mechanical Engineering)

Takehiro NAKAMURA

(Department of Civil Engineering)

Kiyohiro TANAKA

(Department of Mechanical Engineering)

This studies are made of the observation, the hydraulic model experiment and the numerical analysis.

This report presents the results of observations and the facilities of the hydraulic model.

The model of the Ōmura Bay, with the horizontal and the vertical scale of 1/5000 and 1/292 respectively, was constructed according to the Froude's law of similarity and the similarity of diffusion.

## 1. 緒言

大村湾は長崎県の中心に位置しており、換言すれば、大村湾を囲んで、長崎県の各都市が開発されていると言っても過言ではない。この湾は、また、地形上代表的な閉鎖水域を形成しており、環境汚染上の問題点も多い。このため、長崎県環境部を中心とし、同湾の水質汚濁総合対策が進められておるが、筆者らは、この対策の一環として、湾内の流動および拡散を解明することを分担して研究を進めている。

この研究の具体的手段としては、大村湾内での現地

試験と、同湾の水理模型（水平縮尺、1/5000）による実験および、コンピューターシミュレーションによる数値解析の3つを並用して研究を進めている。それぞれに、研究分担者がおり、多数の研究者が協力しているが、この報告では、水理模型について主として述べることにする。

## 2. 研究の概要

前述の通り、この報告では、水理模型について主として述べるが、これに先きだち、第1報なので、この

\*機械工学科

\*\*土木工学科

研究に関連して、従来行なわれた研究や調査、および、他の研究者や研究の分担などについて述べておく。

### 2・1 従来行なわれた研究や調査

(a) 辻田時美氏<sup>1)</sup>は、1953年～1956年にかけて、大村湾の海洋生物の生態や Plankton の異常繁殖などの研究に関連して、湾内流動の観測を行っており、その報告の中に、湾内に反時計方向の大きな旋回流のあることが記載されていることは注意を要する。

(b) 大村空港の建設に関連して、空港建設局と日本気象協会<sup>2)</sup>の共同で、大村湾の海流調査が行なわれた。

(c) 1974年、長崎大学・水産学部の岡、飯塚、中根氏<sup>3)</sup>らは、湾流の観測を行ない、結果は、調和解析を行ない、潮流楕円図にして報告した。

(d) 1975年に、上記観測の補足<sup>3)</sup>が行なわれた。

(e) 1974年に、長崎大学・工学部の栗須、宇都、田中<sup>4)</sup>らは、上記(c)の観測と合わせて、湾岸を大約5等分した6地点(5+1地点)について潮位の観測を行なった。

(f) 1975年に、汚染物質の拡散の解明に重要な拡散係数の観測を、長崎大学・水産学部と工学部の共同で行なった。

(g) 1974年に、工学部において、小型水理模型(1/45000)を作り、概略的の実験を行なった。

(h) 1975年に、工学部において、縮尺1/50000の水理模型を作った。その後、引き続き実験中で、本報告で詳細に述べる。

(i) 1973年以来、工学部において、コンピューターシミュレーションにより、湾流および汚染物の拡散の数値計算を進めており、一部に、すでに報告した。

(j) 1976年、長崎県都市計画課<sup>5)</sup>において、大村湾水質汚濁解析の調査が行なわれた。湾内の流動および拡散の実測とコンピューターシミュレーションによる解析が行なわれた。

### 2・2 研究の分担その他

この研究は、長崎県環境部の依頼を受けて、大村湾水質汚濁対策総合調査の一環として行なったものである。この中で、長崎大学・工学部は、湾内の流動や拡散の研究を分担し、水産学部は、湾内の生物学的視野に立っての研究を分担した。

環境部の調査とは別に、都市計画課の調査も行なわれており、また、大村空港建設の際にも、調査が実施された。尚、辻田氏らの研究は、海洋生物生態学の学

問的研究の一部である。

### 3. 大村湾の潮汐

大村湾は九州の西岸に位置し、その大きさは南北約26km、東西約11km、平均水深20mの扁平な湾である。

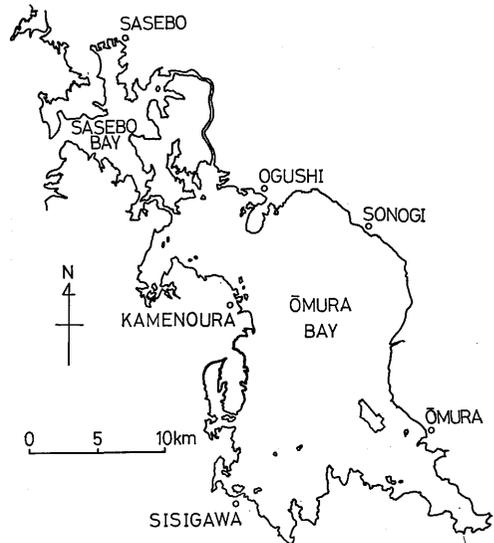


Fig. 1 Rough sketch of the Ōmura Bay and the Sasebo Bay

Constituent	M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>	
	H(cm)	κ(°)	H(cm)	κ(°)	H(cm)	κ(°)	H(cm)	κ(°)
Sasebo	84.3	242.3	38.5	267.9	23.7	214.6	18.2	194.3
Ogushi	21.6	323.5	7.4	352.9	9.8	281.2	7.8	260.5
Kamenoura	22.6		10.5		1.3		1.8	
Sonogi	23.0		10.7		1.3		1.8	
Sisigawa	23.5		10.9		1.3		1.8	
Omura	24	326	9	358	11	275	9	266

Table 1. Tidal constant.

この湾内での潮汐常数を表一1に示す。

これより、潮位については半日周潮が他に比して卓越していること、湾奥に行くにしたがって振幅がわずかではあるが増大していること、小串と大村での M<sub>2</sub> 潮、S<sub>2</sub> 潮の位相差はそれぞれ 2.5° (約5分)、5.1° (約10分) と非常に小さく、湾内水はほとんど一様に上下していることなどがわかる。

潮流に関する観測資料としては、前節 2.1の(a)と(b)がある。

(a) には、図一2に示されるような反時計廻りの環流が存在すると報告されているが、その観測方法等については記述がないため不明である。また(b)は

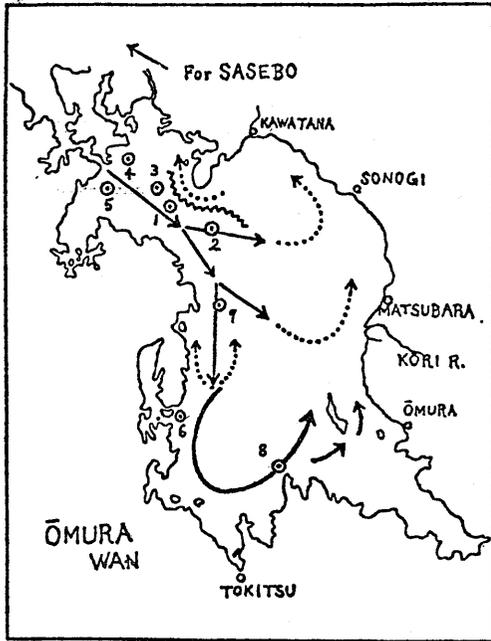


Fig. 5. The Bay of Omura, showing the currents.

- ~~~~~ Current Rip
- Inward Flow
- Outward Flow
- Anticlockwise Circulation
- ⊙~⊙ Stations of Current-Measurements
- 1 ~ 8 1~5 "Shumpu Maru" Station (Hidaka)
- 6 ..... "Cutter" Station (Yasui)
- 7 ..... "Tsuru Maru" Station (Tsujiita)
- 8 ..... "Fishing Vessel" Station (Sakai)

Fig. 2 Tidal residual circulation in the Ōmura Bay (from Tsujita, 1953)

大村空港付近の局所的観測記録である。

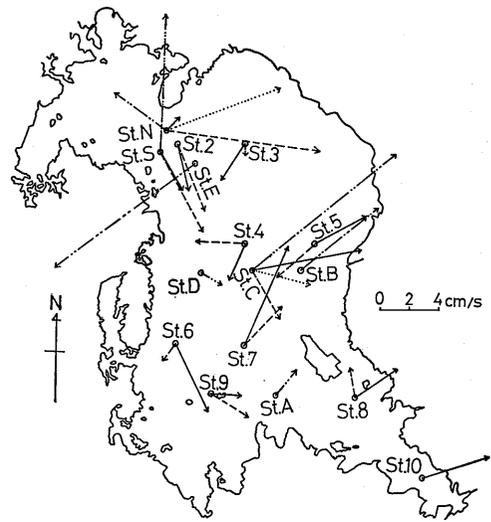
(c), (d) および (j) による観測結果のうち潮汐残差流の結果をまとめたものが図-3 であるが、これらの結果からは反時計廻りの環流があるとは結論し難く、潮流に関する明確な状況は未だ把握されていないのが現状である。

#### 4. 水理模型実験, 相似側および模型縮尺

##### 4.1 水理模型実験

本実験は、大村湾内の汚染物質の混合拡散現象を湾内潮流による水平乱流拡散現象として取り扱うことを目的とした水理模型実験である。

一般に海域での汚染物質の混合拡散する物理的原因は次の三つに大別できる。



Station	Position of observed station		Water depth of measurement	Date of observation				
	N. Latitude	E. Longitude						
St. A	32°53.5'	129°53.6'	→ 2.5m	3-5 Sept. 1974				
St. B	32°57.2'	129°54.5'	→ 2.5m					
St. C	32°57.2'	129°52.7'	→ 2.5m					
			→ 5m					
			→ 10m					
St. D	32°57.1'	129°50.9'	→ 2.5m					
St. E	33°00.4'	129°50.7'	→ 2.5m	22-24 Sept. 1975				
St. N	33°01.4'	129°49.7'	→ 2m					
			→ 5m					
			→ 10m					
			→ 14m					
St. S	33°00.8'	129°49.4'	→ 2m					
			→ 14m					
St. 2	33°01.0'	129°50.0'	→ 5m		13 Feb.-4 Mar.			
St. 3	33°01.0'	129°52.5'			16-17 Feb. 1976			
St. 4	32°58.0'	129°52.5'						
St. 5	32°58.0'	129°55.0'						
St. 6	32°55.0'	129°50.0'						
St. 7	32°55.0'	129°52.5'						
St. 8	32°53.5'	129°56.4'		→ 12m	13 Feb.-4 Mar.			
						St. 9	32°53.4'	129°51.3'
						St. 10	32°51.0'	129°59.0'
St. 8	32°53.5'	129°56.4'		→ 12m	16-17 Feb. 1976			
			St. 9		32°53.4'	129°51.3'		
St. 10	32°51.0'	129°59.0'	→ 12m					

Fig. 3

Residual currents in the Ōmura Bay  
(St. A, B, C, D, E, N, S : after Reference 3)  
(St. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 : after Reference 5)

①分子拡散 ②乱流拡散 ③潮流・海流の移流による拡散

このうち分子拡散は他の二つに比してその効果は小さく無視できる。従って海域での物質の混合拡散を支配する主因は乱流拡散と移流であると考えられる。海域での流れは乱流であり流れの中には種々の大きさの乱れが存在するが、この乱れにエネルギーを供給するものとしては、潮流、海流、河川流、波浪、風などが考

えられる。特に大村湾のような袋状の内湾においてはこの中でも潮流が支配的であると考えられる。また、潮流は水平方向の運動が鉛直方向のそれに比して卓越していることを考慮すると、湾内における汚染物質の混合拡散現象を湾内潮流による水平乱流拡散現象としてとらえることは意義のあることといえる。なお実際には上記の物理的原因以外に生物・化学的原因も考えられるが、それらは本実験においては考慮されていない。

#### 4・2 相似則

模型実験で必要なことは、原型と模型との間に力学的相似が保たれていることである。加うるに本実験は拡散現象を取り扱うため、相似則は潮汐及び拡散の両現象について考慮されなければならない。

##### 4・2・1 潮 汐

潮流は水平方向に卓越しているので、圧力は静水圧分布をなすとみなしてよい。いま直交座標系  $Oxy$  を考え、平均水面に  $x$ ,  $y$  軸、鉛直上方に  $z$  軸をとる。このとき流体の運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_p}{\partial t_p} + U_p \frac{\partial U_p}{\partial x_p} + V_p \frac{\partial U_p}{\partial y_p} &= -g \frac{\partial \zeta_p}{\partial x_p} \\ &\quad - \frac{C_p}{2h_p} \sqrt{U_p^2 + V_p^2} U_p \\ \frac{\partial V_p}{\partial t_p} + U_p \frac{\partial V_p}{\partial x_p} + V_p \frac{\partial V_p}{\partial y_p} &= -g \frac{\partial \zeta_p}{\partial y_p} \\ &\quad - \frac{C_p}{2h_p} \sqrt{U_p^2 + V_p^2} V_p \end{aligned} \quad (1)$$

と書ける。ここで添字  $p$  は(1)式が原型に対する運動方程式であることを表わし、また  $U$ ,  $V$  はそれぞれ  $x$ ,  $y$  軸方向の鉛直平均流速成分、 $\zeta$  は平均水面からの水面の高さ、 $C$  は海底の摩擦係数、 $h$  は水深、 $g$  は重力加速度である。同様に模型に対する運動方程式は添字を模型の  $m$  に代えた(2)式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_m}{\partial t_m} + U_m \frac{\partial U_m}{\partial x_m} + V_m \frac{\partial U_m}{\partial y_m} &= -g \frac{\partial \zeta_m}{\partial x_m} \\ &\quad - \frac{C_m}{2h_m} \sqrt{U_m^2 + V_m^2} U_m \\ \frac{\partial V_m}{\partial t_m} + U_m \frac{\partial V_m}{\partial x_m} + V_m \frac{\partial V_m}{\partial y_m} &= -g \frac{\partial \zeta_m}{\partial y_m} \\ &\quad - \frac{C_m}{2h_m} \sqrt{U_m^2 + V_m^2} V_m \end{aligned} \quad (2)$$

いま、原型と模型との関係を次のようにおく。

$$\begin{aligned} x_r &= \frac{x_p}{x_m}, \quad h_r = \frac{h_p}{h_m}, \quad t_r = \frac{t_p}{t_m} \\ U_r &= \frac{U_p}{U_m} = \frac{V_p}{V_m}, \quad C_r = \frac{C_p}{C_m} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで添字  $r$  は原型と模型の比を表わす。

模型での現象が原型と相似であるためには、(1)式と(2)式の対応する各項の比がそれぞれ等しくなければならない。そこで(3)式を(2)式に代入し、(1)式の各項との比を等しくおくと、

$$U_r = h_r^{1/2} \quad (4)$$

$$t_r = x_r / h_r^{1/2} \quad (5)$$

$$C_r = h_r / x_r \quad (6)$$

の関係が得られる。これらが、模型の現象と原型の現象が相似であるための条件である。(4)式は Froude の相似則であり、(6)式は摩擦抵抗を規定する条件である。模型においても原型と同じ流体を使って実験する場合、Froude の相似則と Reynolds の相似則の両方を満足させることは不可能であるから、摩擦係数は(6)式に従って摩擦係数  $C$  を模型に与えることによって満足しなければならない。

また模型でも原型同様に乱流である場合、抵抗則として Manning の平均流速公式が適用でき、摩擦係数  $C$  は Manning の粗度係数  $n$  を用いて

$$C = 2gn^2/h^{1/3}$$

と表わされるから、(6)式は次のようになる。

$$n_r = h_r^{2/3} / x_r^{1/2} \quad (7)$$

##### 4・2・2 拡 散

拡散方程式は潮流の水平成分だけを考慮すると

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad (8)$$

となる。ここで  $S$  は物質の濃度、 $K_x$ ,  $K_y$  はそれぞれ  $x$ ,  $y$  方向の拡散係数である。

拡散現象においても原型と模型の間に相似が成り立つためには、潮汐におけると同様に(8)式について対応する各項の比が等しくなければならない。

原型と模型の関係をさらに次のようにおくと

$$S_r = \frac{S_p}{S_m}, \quad K_r = \frac{K_{x_p}}{K_{y_m}} = \frac{K_{y_p}}{K_{y_m}} \quad (9)$$

潮汐の場合と同様にして、次の関係を得る。

$$K_r = x_r^2 / t_r \quad (10)$$

いま、水平拡散係数  $K$  については乱れが十分に発達した場合、拡散の scale に関する  $4/3$  乗則

$$K = \epsilon^{1/3} \ell^{4/3} \quad (11)$$

が成り立つとすると、原型と模型との比は

$$K_r = \epsilon_r^{1/3} x_r^{4/3} \quad (12)$$

となる。ここで  $\epsilon$  は単位時間、単位質量当りのエネルギー逸散率、 $\ell$  は現象の規模である。

原型と模型で  $\epsilon$  が等しいとすると  $\epsilon_r = 1$  となり、(10)式と(12)式より

$$t_r = x_r^{2/3} \quad (13)$$

が得られる。また(5)と(13)式より

$$h_r = x_r^{2/3} \tag{14}$$

が得られ、さらに(7)式と(14)式より

$$n_r = x_r^{-1/18} \tag{15}$$

さらに、(4)式と(14)式より

$$U_r = x_r^{1/3} \tag{16}$$

が得られる。

以上の相似則に従えば、水平方向の縮率  $x_r$  (縮尺の逆数) を決めると、他の縮率  $t_r$ ,  $h_r$ ,  $n_r$ ,  $U_r$  がそれぞれ(13), (14), (15), (16)式から一意的に決まる。

### 4・3 模型縮尺

本模型における拡散現象は水平乱流拡散現象として扱うため、模型内での流れは乱流でなければならない。このため、模型内での Reynolds 数なるべく大きくなるように模型の縮率を小さくしなければならない。しかし、他方では模型の建設費、用地面積等の厳しい制約のため本実験では、潮汐と拡散の両水理現象の相似性が保証される範囲内で最小限度可能と思われる中縮尺  $1/x_r = 1/5,000$  の模型を作ることにした。よって相似則より決定される模型の縮尺は表一2 のようになる。

この縮尺での模型の Reynolds 数を検討しておく。原型では平均水深 20m, 湾内中央部での最大流速 20 cm/s であるから、いま代表長として水深と最大流動

	Model	Prototype
Horizontal length	1/5000	1
Vertical length	1/292	1
(Mean water depth)	6.8cm	20m)
(Tidal range)	1.64mm	48cm)
Time	1/292	1
(Tidal period)	2m 33s	12h 25m)
Velocity	1/17.1	1
(Maximum velocity)	1.17cm/s	20cm/s)
Manning roughness coefficient	1/0.623	1
Diffusion coefficient	1/8.55×10 <sup>4</sup>	1

Table 2. Scale ratios of the model

距離<sup>6)</sup>をとると原型における Reynolds 数はそれぞれ  $4.0 \times 10^8$ ,  $5.7 \times 10^8$  となる。この値に対応する模型での Reynolds 数はそれぞれ  $8.0 \times 10^2$ ,  $6.7 \times 10^8$  となり、模型における流れも乱流であると考えられる。

### 5. 実験施設

実験施設は、模型水槽、起潮機、計測装置よりなる。

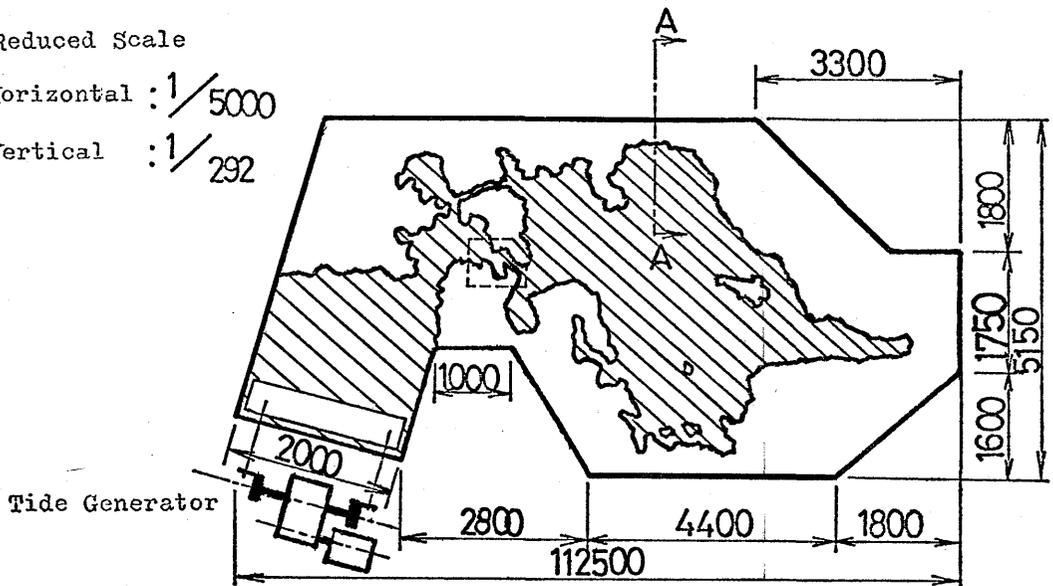
#### 5・1 模型水槽

模型の概要を、(図-4)に載せた。長さ 11.25m,

Reduced Scale

Horizontal : 1/5000

Vertical : 1/292



(Unit : mm)

--- First Produce

Fig. 4 General view

巾 5.15m のもので、この中で、西海橋付近は、（点線に区切ったところ）特に精密に作った。

模型の製作にあたっては、地形の整形が容易であること、修復が容易であること、粗度調整が容易にできること、漏水を完全に防げること、現地地形に忠実に相似になるように、以下に述べるような、3つの工夫を加えた。すなわちその1は、コンピュータ・グラフィックによる断面ゲージを多数用いたことである。（写一1参照）別に、コンピュータ・シミュレーションを実施しており、このために、現地の地形は、コンピュータが記憶しておるので、ゲージ製作には、地

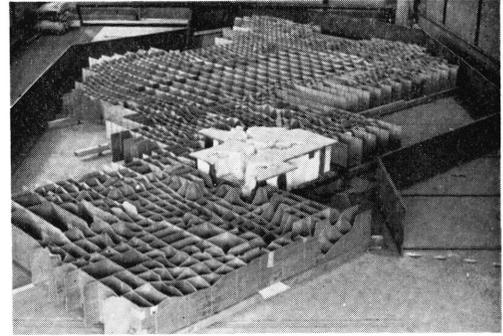


Photo. 1 Section gage

### A-A Sectional View

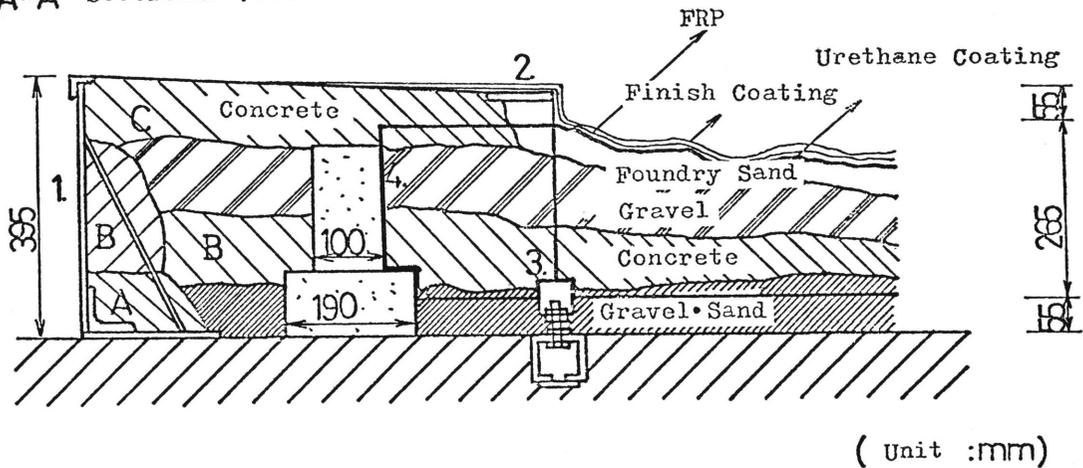


Fig. 5 Sectional view

形データを模型の原寸大に拡大した。断面ゲージの製作には、正確のため、近接した海図上の水深を関数近似して求めた。これらの図より、明らかのように、多数のゲージ（メッシュ間隔10cm・5cm）を用いている。

西海橋付近の地形は複雑なので、とくに精密を期するため、海図の水深点に相当する多数の点（約 2000 点）に、ゲージ（鉄棒）を立てた。工夫のその2は、（図一5、写一2）に示したような、水平レールを用いた点である。多数のゲージを水平に設置するための考慮で、引き抜き加工されたアルミ型材が、精度が良く出来ている点に着目し、先づ、これを水平に設置し、（写一2参照）これを基準として、多数の断面ゲージ（写一1・写一3参照）を設置した。工夫のその3は、自硬性鑄物砂を用いた点である。この砂は、成分の配合を換えることにより、硬化時間を自由に变化出来て、断面ゲージに沿った模型を仕上げるのに好

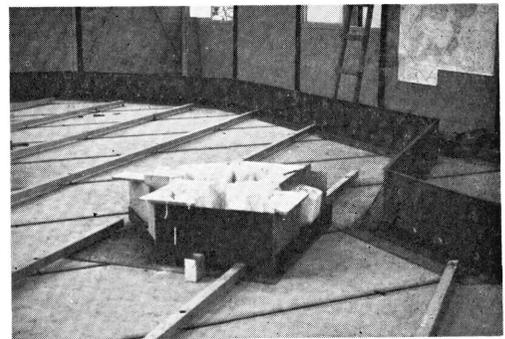


Photo. 2 Standard rail

都合であった。写一3は、自硬性鑄物砂による整形途中を示す。鑄物砂の上には、防水のため、F・R・P（Fiber Reinforced Plastic）の積層を行ない（写一4）、その後、表面仕上げ塗装して完となる。



Photo 3 Production process by foundry sand

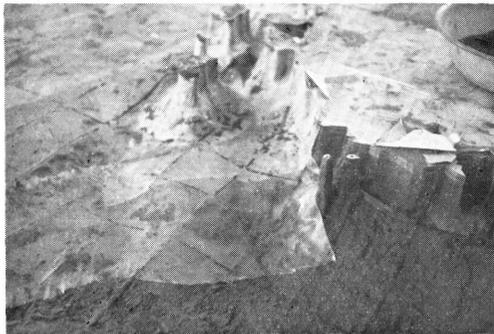


Photo 4 FRP.

### 5・2 起潮機

起潮機はプランジャー式を用い、その波形の一例を図-6に示す。平面的な取り付け位置は、図-4に示したが、これらの構造を図-7に示した。また、これの完成写真を、写-5に載せた。

起潮機の駆動には、6極の誘導電動機（同期速度1200rpm）を用いたが、模型の周期は、時間縮尺が、1/292であるので、2分33秒（Table-2参照）となる。このためには、約1/3000の減速が、必要となっ

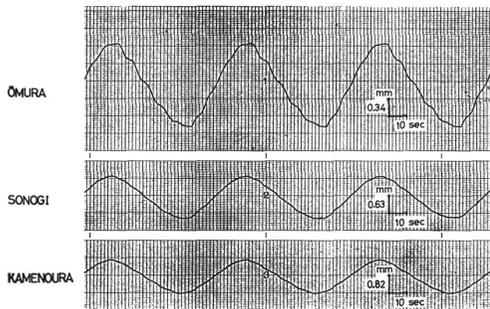


Fig. 6 Record of sea level in the model

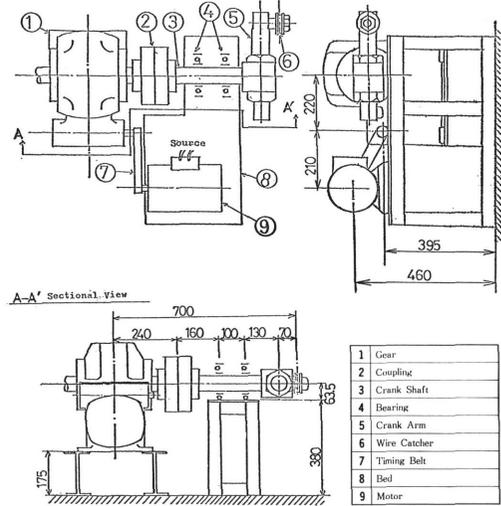


Fig. 7 Tide generator

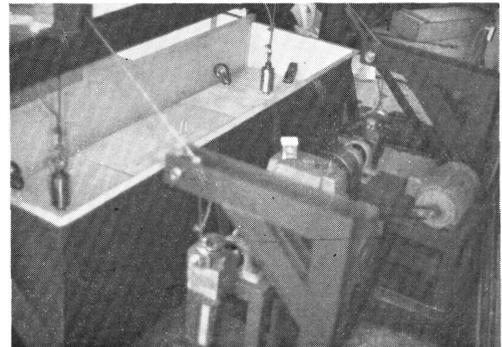


Photo 5 Tide generator

た。減速には、電源周波数の（40c/sec～70c/sec）の変化による誘導電動機の減速（40/60=1.5 可変）、ベルト減速（1/2）、ウォーム・ギヤー（1/1250）の3段階を用いた。3者の中で、最も減速化の大きいのは、ウォーム・ギヤー減速で、これと、ベルト減速の組合わせて、約1/2500の減速が可能である。残りの減速は、電源周波数の可変で行なった。前2者の減速は固定であるが、周波数変換が連続なので、任意の周期が得られる。また、水位振巾は、クランク・アームの半径が可変（ネジ式10～20cm）なので、自由に調整出来る。

### 5・3 計測装置

模型の鉛直縮尺が1/292となったため、大村での平均潮差は1.64mm、最大流速は1.17cm/secと非常に小さくなり、潮位、潮流の測定のための精密な計

測器が必要となった。

潮位計については、モーターの軸の偏心等の測定に使用される、ギャップセンサーを用い、水面に浮かべたアルミニウム板の変位量を測定する高精度の潮位計を製作し、使用している。この潮位計の誤差は現在のところ  $\pm 0.02\text{mm}$  程度である。



Photo. 6 Tidal meter

潮流の測定は、浮標を水面に浮かべ浮標の移動距離を写真撮影より求め、移動時間で割って流速を得る浮標追跡法を用いている。よって求められた流速は平均流速であるから、実際の流速より少し小さめの値となる。また浮標追跡法は、Lagrange 的流速であり、一方現地観測との比較のためには、Euler 的流速（潮流楕円）が必要である。そのため本実験では次の方法で近似的に潮流楕円を求めた。

i) 10個の平均流速で潮流楕円を描く。

ii) そのため、測定地点付近に多数の浮標を浮かべ1/10周期（15秒）間隔で11枚の写真を撮る。（連続した2枚の写真から1個の流速が得られるから、計10個の流速が求められる。）

iii) 各2枚1組の写真から測定地点を中心に囲んで動く4つの浮標を選び出し、それら4つの浮標の流向、流速をそれぞれ求める。

iv) 4つの流速を平均した流速を求める。この流速をその時刻でのその測定地点での流速と考える。

## 6. 結 言

大村湾の汚染防止総合対策の一環として、筆者らは、同湾の（水平縮尺：1/5000 鉛直縮尺：1/292）水理模型を作り、研究を進めている。

現在、潮位、潮流および拡散についての実験中であるが、水理模型についての資料が、まとまったので、ここに報告した。

謝辞：本研究を行うに当たり、実験を長崎大学に委託された長崎県環境部の部長以下公害規制課の諸氏、潮位計の開発に協力を頂いた本学工学部機械工学科の宇都幸一助手並びに卒論研究として模型の製作に協力して頂いた能丸憲樹（現、井関農機<sup>株</sup>）、林田俊幸（現、西島製作所）、東忠（現、奥村道路<sup>株</sup>）、山口弘大（現、広瀬建設<sup>株</sup>）の諸氏に対して、ここに記して深甚の謝意を表します。

## 参考文献

1. 辻田時美：大村湾の海洋生物学的一考察，日本海洋学会誌，第9巻，第1号，pp.23~32，1953.
2. 長崎県大村空港建設局・日本気象協会福岡本部：大村湾海流調査報告書，1971.
3. 長崎大学水産学部：大村湾水質汚濁対策総合調査報告書，1976.
4. 長崎大学工学部機械工学科流体研究室：大村湾水質汚濁対策総合調査報告書，第2集，第1報，1976.
5. 日本下水道事業団：長崎県大村湾水質汚濁解析調査報告書，1976.
6. 樋口明生：潮流模型における乱流度に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第15号B，pp.425~430，1972.