

松川浦における潮流の水理模型実験

樋口 明生・辻 正明

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE TIDAL CURRENT IN MATSUKAWA-URA

By Haruo HIGUCHI and Masaaki TSUJI

Synopsis

The flow pattern and diffusion phenomena due to the tidal current in a very shallow estuary are studied through a hydraulic model experiment, for which the Matsukawa-Ura is used as the prototype. The effect of density, wind and waves are not considered.

A distorted model with horizontal and vertical scales of 1/600 and 1/50 respectively, was constructed and a semidiurnal tide was provided for it. The flow pattern was investigated by tracing many floats and the diffusion of dyed water by dye concentration analysis. The diffusivity reduced through the mixing theory of tidal flushing by B. Arons and H. Stommel is $0.8 \sim 1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$.

1. ま え が き

福島県にある松川浦は、太平洋に面する袋状の浅い内湾で、ノリをはじめとする県下唯一の浅海養殖漁場である。ここにおけるノリ等の漁獲量は、現状では、海水交流のさかんな湾口付近ほど多く、交流の悪い湾奥部ではきわめて少ない。そこで、作滞を行なうことによって、湾内の海水交流を促がし、漁場を拡張するとともに、生産性を向上させようという計画が立てられている。

こうした計画を合理的に進めるには、計画完成後の状態を事前に把握する必要があり、このために水理模型実験を行なった。

一般に、海水交流には、潮流のほか、恒流、密度流、吹送流その他種々のものが影響すると考えられるが、ここでは、現地に則して、潮流が支配的なものと考え、作滞による湾内の流況および海水交流の変化を実験的に求めた。

2. 原 型^{1)~5)}

松川浦は、福島県北部に位置し、狭い湾口によって太平洋と通ずる閉塞的内湾である。湾口部は、幅約 60 m、水深約 4 m、長さ約 500 m の水道で、最小通水断面積は 219 m^2 である。湾の周囲は 20.5 km、水面積は約 6.46 km^2 、平均水深は 124 cm である。湾内の深淺図を Fig. 1 に示す。高さの基準面 ($D.L. \pm 0 \text{ m}$) は $T.P. - 1.072 \text{ m}$ である。

湾口検潮所 (St. 1) における 5 年間の旬平均潮位¹⁾ は Fig. 2 に示すように、3月に低く、9月に高く、その差は約 30 cm であり、湾内平均水深の約 1/4 に相当する。湾内における潮汐の調和常数を Table 1 に示す²⁾。これによると、湾口では日周潮 (K_1 および O_1 潮) もかなり大きいのが、半日周潮 (M_2 および S_2 潮) がやや卓越している。潮型示数 [$F = (H_K + H_0) / (H_M + H_S)$] は $F = 0.86$ となり、準半日周潮型である。湾内各点における潮候曲線は Fig. 3 に示すように、奥部に行くにつれて振幅は小さくなり、位相は遅れる。湾口と湾奥との位相差は、満潮時に小さく約 30 分で、干潮時に大きく約 3 時間である。これらを図に示す

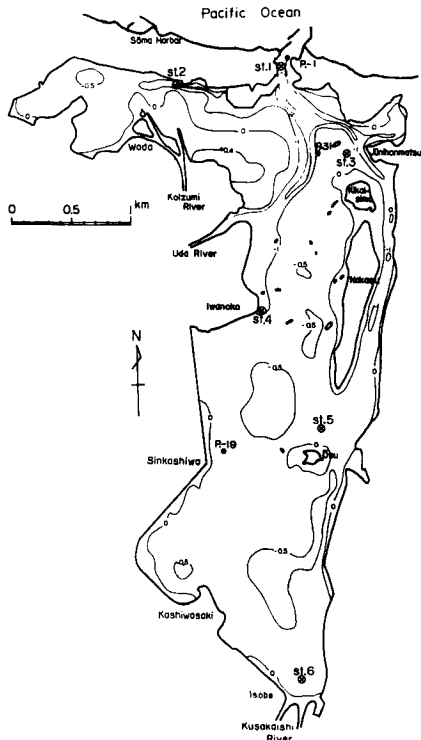


Fig. 1 Bathymetric chart of Matsukawa-Ura.

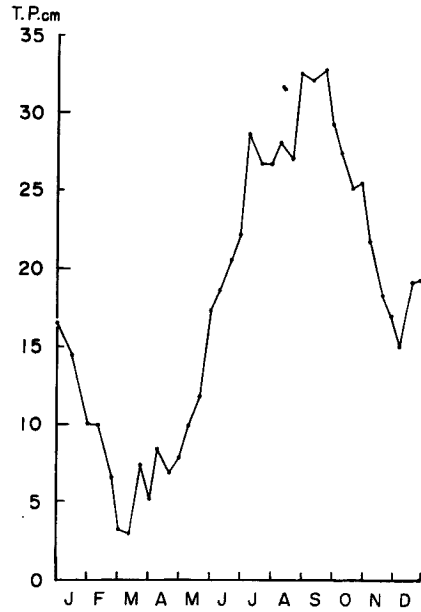


Fig. 2 Ten days mean sea level during five years at the mouth of Matsukawa-Ura.

Table 1 Tidal constant in the prototype.

	St. 1		St. 4		St. 5	
	H (cm)	κ (°)	H (cm)	κ (°)	H (cm)	κ (°)
M_2	26.41	127.50	16.67	162.02	16.07	179.04
S_2	17.36	150.61	9.14	185.75	10.12	15.92
K_1	18.66	347.56	15.51	17.16	15.54	24.53
O_1	18.91	168.61	12.98	181.70	13.74	186.32

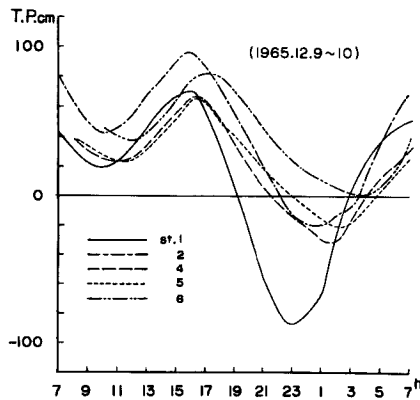


Fig. 3 Tidal curve in Matsukawa-Ura. (prototype)

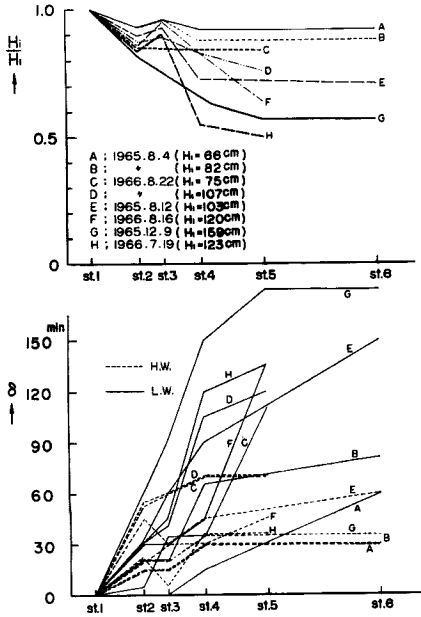


Fig. 4 Ratio of amplitude H_i/H_1 and phase lag δ versus distance. (prototype)

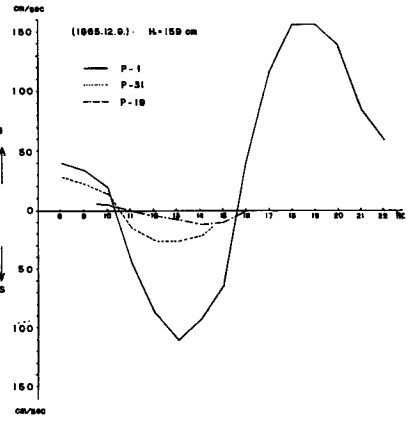


Fig. 5 Time change of velocity of tidal current. (prototype)

と、Fig. 4 のようである。図の横軸は湾口からの距離、縦軸は湾口を基準とした振幅比 H_i/H_1 、および湾口との位相差 δ である。図は、相つぐ干満の差を潮差とみなして示したもので、調和分解の結果ではない。この図によると、振幅は湾奥に行くにつれて減衰するが、振幅比は、湾口潮差により異なり、湾口における潮差が大きい場合ほど、湾内でよく減衰することがわかる。湾奥 (St. 6) における振幅比は、湾口潮差 159 cm に対して 57% 程度である。また、位相差は、湾口における潮差が大きいほど、大きく、湾口潮差 159 cm に対して、満潮では、35 分、干潮では 180 分の程度である。潮流についての資料は少ないが、Fig. 1 に示されている P-1, P-31, P-19 における時間的変化は Fig. 5 のようである。

湾内の塩素量の時間的変化および塩素量の水平分布は、Fig. 6 および Fig. 7 に示すようである。数値は外海の塩素量を基準として % で示してある。当日は 10 時 18 分に干潮、15 時 54 分に満潮であり (潮差 74 cm)、図に示す 16^h 00 の線がほぼ満潮時の状態を表わすと考えてよい。図によると、満潮時に湾口から 3 km ($x/L=0.5$) 以遠で、塩素量の急激な減少がみられるが、これは 1 次的な外海水との交流が 2~3 km までに限られていることを示すものと考えられる。

このような海域においては、適用性に多少問題はあがあるが、松川浦を一様断面の直線水路とみなして、Arons-Stommel⁹⁾ の概念を用いて拡散係数を試算してみる。フラッシュ係数 F および拡散係数 A はつぎのように表わされる。

$$F = Dh^3 T / 4\pi B \xi_0^2 V \dots\dots\dots (2.1)$$

$$A = 2B \zeta_0 u_0 \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに D は河川流量、 h は水深、 ξ_0 は潮汐の振幅 (半潮差)、 T は周期、 V は estuary の全容量、 $2\zeta_0$ は最大流動距離、 u_0 は最大流速である。

Fig. 6 に示された塩素量分布から、フラッシュ係数を求めると $F=0.14$ となり、当日の条件 ($D=7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=137 \text{ cm}$, $T=4.47 \times 10^4 \text{ sec}$, $\xi_0=37 \text{ cm}$, $V=8 \times 10^{12} \text{ cm}^3$, $u_0=9.0 \text{ cm/s}$, $\zeta_0=1.28 \times 10^5 \text{ cm}$) と (2.1) 式から、無次元量は $B=0.036$ となり、拡散係数は $A=0.9 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。

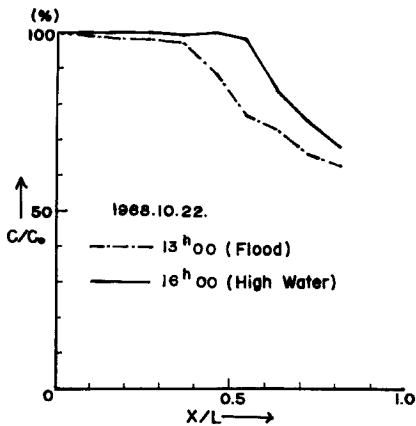


Fig. 6 Time change of chlorinity distribution. (prototype)

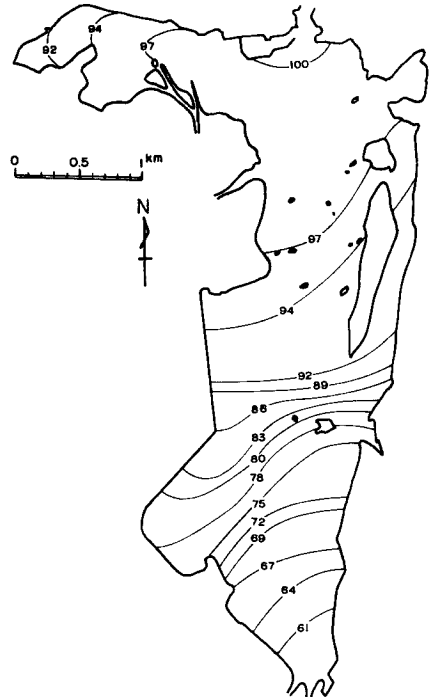


Fig. 7 Horizontal distribution of chlorinity. (prototype)

湾内での海底摩擦係数としては、数値計算の結果から、マンングの粗度係数として、 $n_p=0.035\sim0.04$ が推定されている⁹⁾。

3. 相 似 性

実験を行なうにあたって、最も重要なことは、いうまでもなく、原型と模型との間に力学的な相似性が保たれていることであるから、この点を十分考慮して、まず、現地観測資料に基づいて検証実験を行ない、相似性を確かめたのち、必要な実験を行なわねばならない。原型におけるすべての現象について相似性を満たすことは原理的に不可能であるから、ここでは多くの現象のうちから抽出された特定の現象、すなわち松川浦内の潮汐・潮流について、原型と模型との間に相似性が保たれることを考える。

潮流は、水平方向に卓越しており、圧力は静水圧で近似できるから、水平と鉛直の縮率の異なる、いわゆる歪んだ Froude 模型で、海底摩擦の効果をあわせれば、潮汐や潮流について、相似性が成り立つと考えられる。

Froude 模型における力学的相似の条件はつぎのようである⁹⁾。

$$t_r = x_r/h_r^{1/2} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$c_r = x_r^{-1}h_r \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに、 x は水平方向の長さ、 h は鉛直方向の長さ、 t は時間、 c は摩擦係数であり、添字 r は、原型の量と模型の量との比を表わす。

(3.1) 式は、Froude の相似則であり、(3.2) 式は、摩擦抵抗を規定する条件である。(3.1) 式は、決定された空間縮率に応じた時間縮率を用いて実験を行なわねばならないことを示している。摩擦係数 c は、一

般に Reynolds 数の関数であるが、潮流は、周期的に変化するから、摩擦係数も時間的に変化すると考えられる。しかし、原型の摩擦係数の時間的変化がよくわからないばかりでなく、模型においても、そのような摩擦係数を与えることが可能かどうかよくわからないので、ここでは代表的な摩擦係数として、最大流速に関する値を考える。模型内でも乱流が支配的であり、抵抗則として、Manning の条件が適用できると考えると、摩擦係数 c は、Manning の粗度係数 n を用いて

$$c=2gn^2/R^{1/3} \dots \dots \dots (3.3)$$

で表わされる⁷⁾ から、(3.2) 式はつぎのようになる。

$$n_r = x_r^{-1/2} R_r^{2/3} \dots \dots \dots (3.4)$$

ここに R は径深を表わす。松川浦の場合のように、水面幅が広くて、 $R \approx h$ とみなせる場合は、(3.4) 式は

$$n_r = x_r^{-1/2} h_r^{1/3} \dots \dots \dots (3.5)$$

となる。これが乱流模型における、摩擦条件であり (3.5) 式によって規定されるような粗度係数を模型に与えれば、力学的相似は保たれると考えられる。

流速の鉛直分布が対数で表わされる場合には、粗度係数と、各パラメーターの間には、つぎのような関係がある⁸⁾。

$$n/R^{1/3} = 1/\sqrt{g}(A_0 + 1/\kappa \ln R/k') \dots \dots \dots (3.6)$$

ここに、 A_0 は、潤辺の粗滑、水路断面形状、および水流の特性など、流速分布に関する諸要素の関数と考えられる積分常数、 κ はカルマン常数、 k' は、潤辺の粗度の高さを表わす値であるが、明確な物理的解釈はない。

模型の鉛直縮尺を決定する際には、模型水深そのものについても考慮しなければならない。すなわち、模型内の水深が小さすぎると、粘性境界層の効果が、強調されすぎる⁸⁾ から、模型内の水深は、普通 1 cm 以上必要であるといわれている。

以上のことを考慮し、水平縮率を 1/600 として、相似則を検討してみる。松川浦の平均水深は、124 cm であるから、模型の水深を、1 cm 以上にするためには、鉛直縮率は、1/124 以上でなければならない。1/124 以上の数種類の鉛直縮尺について試算した粗度係数 n_m 、および相当粗度 k' は、Table 2 のようである。

Table 2 Roughness coefficient and equivalent roughness of the model. $X_r=600$

h_r	$h_p=124$ cm	n_r	$n_p=0.035$		$n_p=0.040$	
	h_m (cm)		n_m	k' (cm)	n_m	k' (cm)
30	4.13	0.394	0.089	19.57	0.102	21.80
50	2.48	0.554	0.063	9.22	0.072	10.48
80	1.55	0.758	0.046	4.27	0.053	5.13
100	1.24	0.879	0.040	2.94	0.046	3.50
124	1.00	1.015	0.034	1.93	0.039	2.41

る。この表からわかるように、いずれも、模型に与えるべき相当粗度 k' は、模型の平均水深 h_m よりも大きくなり、摩擦抵抗としての意味をなさないので、このような考え方は、ここでは、そのまま適用できないことになる。

したがって、ここでは通常の人工粗度の代りに、より大きい抵抗を与えるとき期待される金網を用いることにし、試行錯誤的にその枚数を調節して、相似の条件を見出すことにして、鉛直縮率を 1/50 と決定した。 $x_r=600$ 、 $h_r=50$ とした場合の模型の諸元を Table 3 に示す。

拡散現象には、種々の周期の乱れが関与しているが、このうち潮汐周期の乱れによるものについては、潮

Table 3 Hydraulic factors in the prototype and the model.

Factor	Scale	Prototype	Model
Distance	1/600	3.0 km	5.0 m
Water Depth	1/50	100 cm	2.0 cm
Tidal Range	1/50	150 cm	3.0 cm
Tidal Period	1/84.8	12 ^h 25 ^m	8 ^m 47 ^s
Velocity	1/7.07	20.0 cm/s	2.8 cm/s
Discharge	1/2.12×10 ⁵	1.0 m ³ /s	4.71 cm ³ /s
Diffusivity	1/4.2×10 ³	10 ⁵ cm ² /s	2.4×10 cm ² /s

汐に関する相似が成り立っておれば、拡散現象についても相似が成り立つと考えられる。拡散係数 K は $[L^2 T^{-1}]$ なるディメンジョンをもつから相似性が成り立つ場合には

$$A_r = x_r^2 t_r^{-1} = x_r h_r^{1/2} \dots \dots \dots (3.7)$$

なる関係があり、この模型では、 $A_r = 4.2 \times 10^3$ となる。

4. 実験施設

4.1 模型水槽

水平縮率 1/600, 鉛直縮率 1/50 の松川浦全域の模型を **Photo. 1** および **Fig. 8** に示す。大きさは、5.4 m × 11 m である。当初、海底をモルタル刷毛仕上げにしたが、予備実験の結果この程度の粗度では不十分であることがわかったので、人工粗度として金網（規格は #20×8）を数枚重ねて敷きつめた。使用した金網の枚数を **Fig. 9-(a)** に示す。現況に関する実験を行なったのち、**Fig. 8** に破線で示すような作漑を行ない（ $T.P. - 3.072$ m まで）、**Fig. 9-(b)** に示すように金網を敷いて実験を行なった。

4.2 起潮機

模型に潮汐を与えるために、幅 5.4 m, 容積約 1 m³ のプランジャー式起潮機を用いた（**Fig. 8** 参照）。これによって起こし得る水位変動は、全振幅 0~5.0 cm, 周期は 3 分~30 分の範囲である。

この起潮機によって、本実験では、潮差、1.4~3.2 cm, 周期 8 分 47 秒の潮汐を与えた。これは原型では、潮差、70~160 cm, 周期、12 時間 25 分に相当する。

4.3 計測装置

水位は、**Fig. 8** に⊗印で示される 6 点で、電気抵抗式水位計により測定した。

流速は、当初、直径 3 cm, 厚さ 2 mm の黒いコルク板を多数水面に浮かべ、これを一定時間間隔で、真上から、写真撮影する方法により求めたが、後半は現況については模型内の P-1 から P-27 の 27 点、作漑後に関しては、漑内の P-28 から P-44 の 17 点を追加した合計 44 点において、直径 3 mm 程度の発泡スチロールの浮標を流し、一定距離の流下時間と方向を測定することによって求めた。湾内の染料濃度は、採水して蛍光光度計により測定した。

5. 実験経過

2 で述べたように、松川浦における潮汐は、準半日周潮型であるから、ここでは半日周潮のみを取り扱った。まず、試行錯誤的に各種の湾口潮差および人工粗度について、原型の資料と比較しつつ実験を行ない、振幅比と位相差が相似になるような摩擦条件を求めた。このようにして求めた人工粗度を用いて現況に関する検証実験を行ない、潮汐および潮流に関する相似性を確認したのち、作漑を行ない、将来模型に関する実験を行なった。

湾内における拡散は、染料の濃度分布から求めた。ウラニンで着色された外海水は、潮流によって湾内に

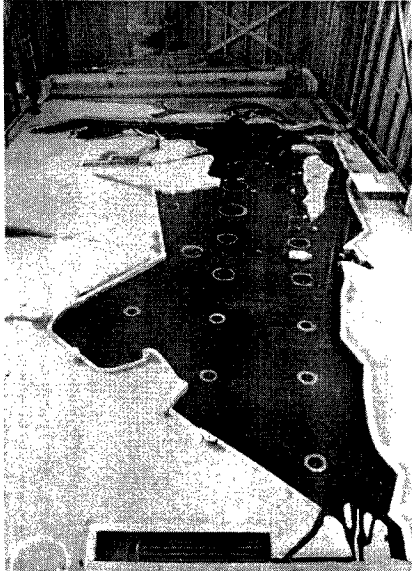


Photo. 1 Model of Matsukawa-Ura.

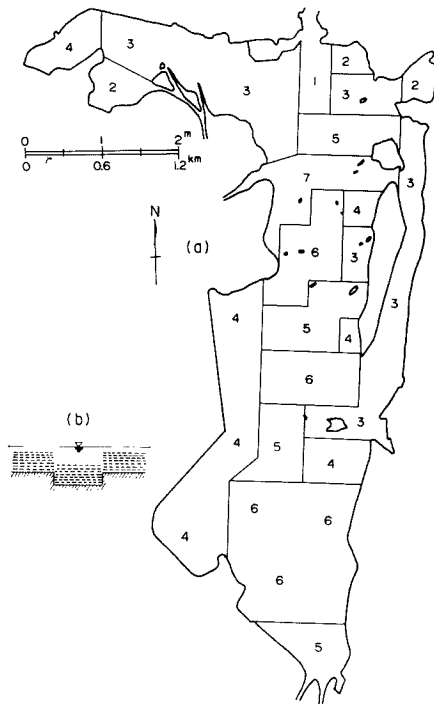


Fig. 9 Number of wire net used in the model as the artificial roughness.

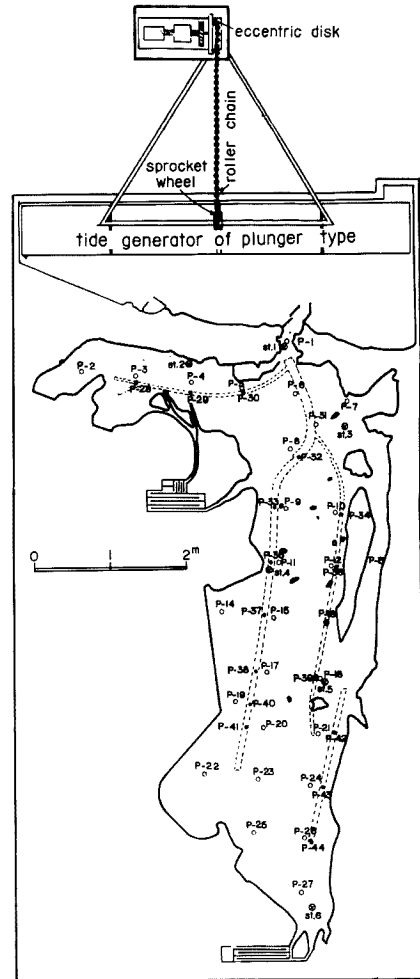


Fig. 8 Model of Matsukawa-Ura.

拡散するが、模型には sink がないため、定常状態は実現しないので、各点における濃度の増加率が一定値を下廻った状態を疑似定常状態とみなした。実際には、実験開始後 30 周期でこの状態に達した。この場合、湾奥の目下石川より河川流量として 3.32 cc/s 流した。これは、目下石川の平均流量 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ に対応する⁴⁾。なお、模型では湾内容積に較べて、外海の容積が小さいため、外海水の濃度が低下するおそれがあるので、実験中は染料の補給を行ない濃度を一定に保つようにした。

さらに、相似性が得られたと思われる金網の敷き方や枚数に関して、妥当な粗度条件を満足しているかどうかを調べるため、別途に直線水路を用いて、金網の抵抗係数を求めた。同時に、種々の敷き方について、表面流速

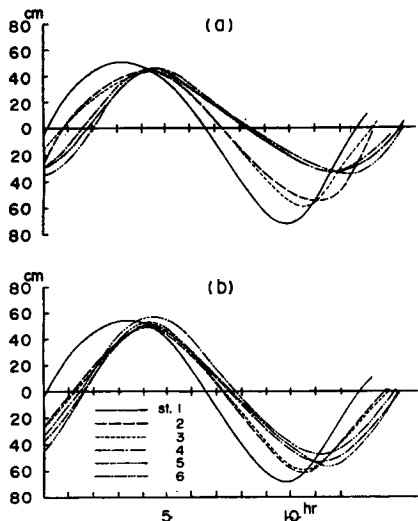


Fig. 10 Tidal curve for present state (a) and dredged state (b).

と断面平均流速との関係をも調べた。

6. 実験結果

6.1 現況に関する実験

(a) 潮差と位相

現況の模型に、数種の振幅の正弦波を与えて、湾内の水位の時間的変化を測定した。一例を Fig. 10 (a) に示す。図は湾口潮差 $H_1=122$ cm の場合である。これを湾口を基準とする振幅比 H_i/H_1 と位相差 δ の形で表わすと Fig. 11 のようになる。図によると、振幅が大きいほど、湾内における振幅比は小さくなり、位相差は大きくなることわかる。

(b) 流速

実際に測定したのは表面流速であるが、ここには後述するような方法で平均流速 \bar{u} に換算した値を示す。模型内 P-1, P-31, P-19 の各点における流速の時間的変化は Fig. 12 のようである。また、P-1~P-27 (Fig. 8 参照) の各点における下げ潮時 (a) および上げ潮時 (b) における流速最盛時の流況を Fig. 13 に示す。

(c) 平均水位 (M.S.L.) の影響

原型における湾内の旬平均潮位は、Fig. 2 からわかるように、春季と秋季とでは約 30 cm の差があるが、この差は平均水深 (124 cm) の約 1/4 となり、水深に比して無視できないから、湾内の振幅比および位相差に影響するものと考えられる。そこで平均水位 (M.S.L.) を変化させて実験を行なった。結果を Fig. 14 に示す。この図から、水深が小さい (M.S.L. が低い) ほど、振幅比は小さくなり、位相差は大きくなること

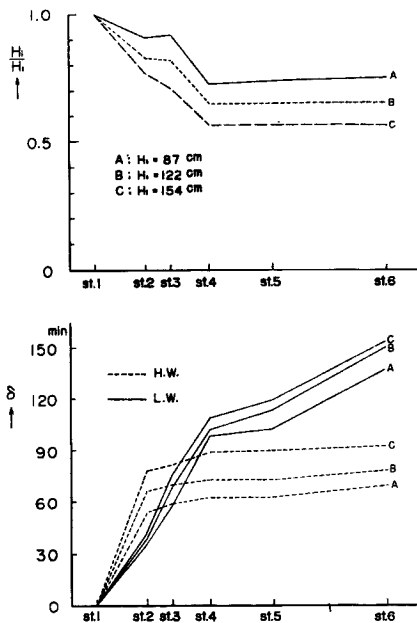


Fig. 11 Ratio of amplitude H_i/H_1 and phase lag δ versus distance.

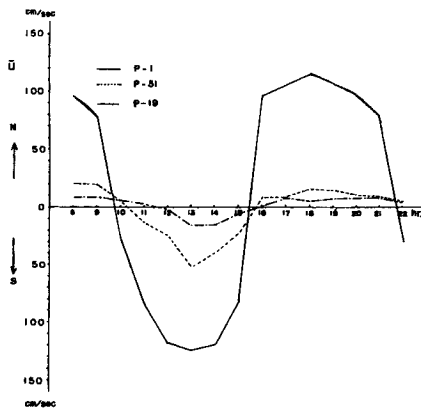


Fig. 12 Time change of velocity of the tidal current. (present state, $H_1=122$ cm)

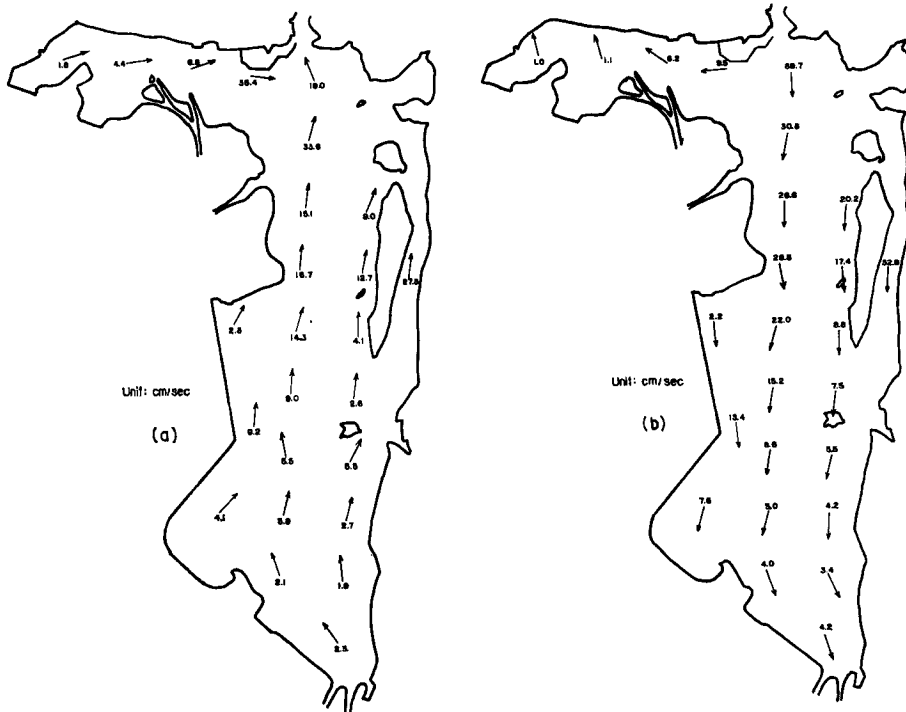


Fig. 13 Flow pattern for maximum ebb current (a) and flood current (b). (present state, $H_1=122\text{cm}$)

がわかる。

(d) 濃度分布

湾内における塩素分布は、湾口潮差および平均水位によって影響されると考えられるが、ここでは比較的原型の資料の整っている湾口潮差 $H_1=74\text{ cm}$, 平均水位 $D. L.+102\text{ cm}$ の場合と、標準的な例として、 $H_1=123\text{ cm}$, $D. L.+88\text{ cm}$ について検討した。実験開始後 30 周期目の濃度分布を Figs. 15~18 に示す。河川流量は 3.32 cc/sec (原型では $0.7\text{ m}^3/\text{sec}$) である。Fig. 15 および 16 は前者, Fig. 17 および 18 は後者に関するものである。

Fig. 15 および 17 によると、外海水の第 1 次影響域は湾口より、3~4 km のあたりまでで、それ以遠で濃度の急激な低下がみられ、干潮時には湾奥では、湾口濃度の約 50% 以下となる。

6.2 作滞後に関する実験

(a) 潮差と位相

作滞後の模型に、現況の場合と同様に数種の波高の正弦波を与えて湾内の潮位の時間的変化を測定した。結果の一部を Fig. 10 (b) に示す。

湾口を基準とする振幅比 H_i/H_1 および位相差 δ の形

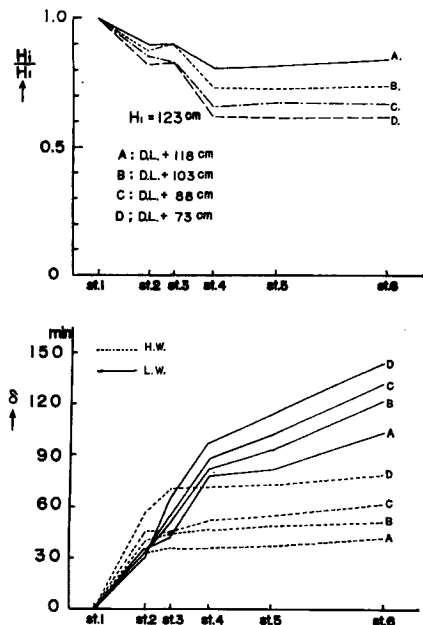


Fig. 14 Effect of mean sea level on the ratio of the amplitude H_i/H_1 and phase lag δ . (present state, $H_1=123\text{ cm}$)

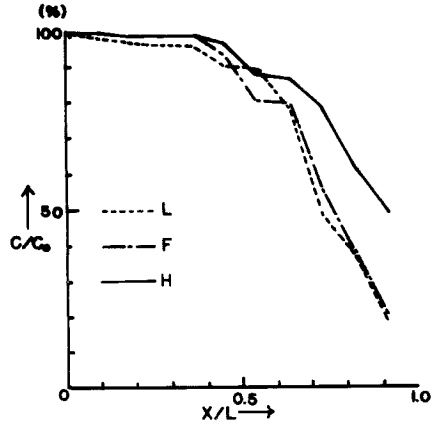


Fig. 15 Dye concentration versus distance. (present state, $H_1=74$ cm, $M. S. L.=D. L.+102$ cm)

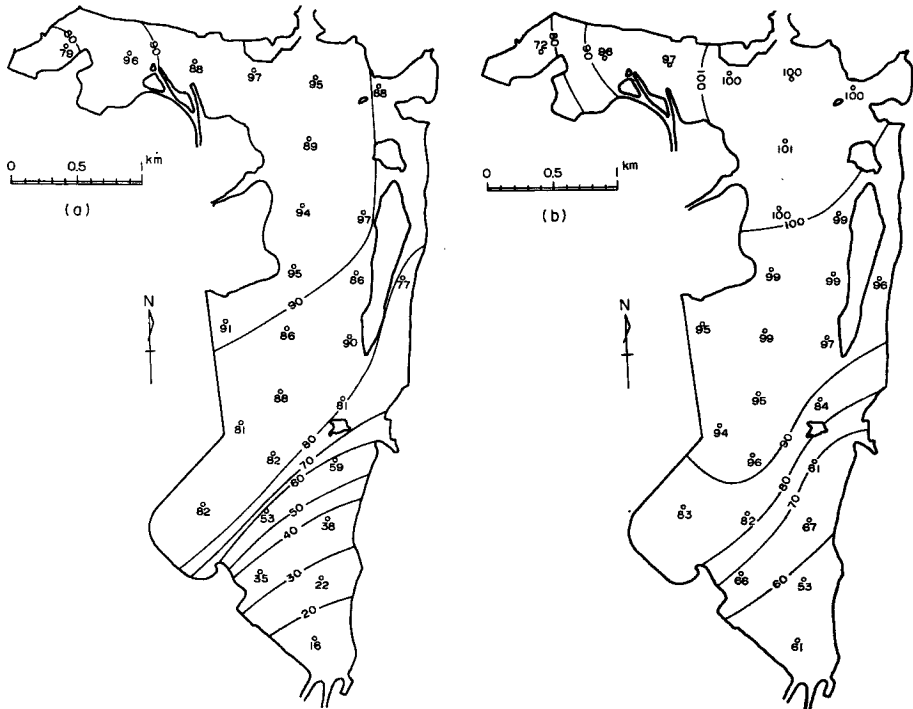


Fig. 16 Horizontal distribution of dye concentration at low water (a) and high water (b). (present state, $H_1=74$ cm, $M. S. L.=D. L.+102$ cm)

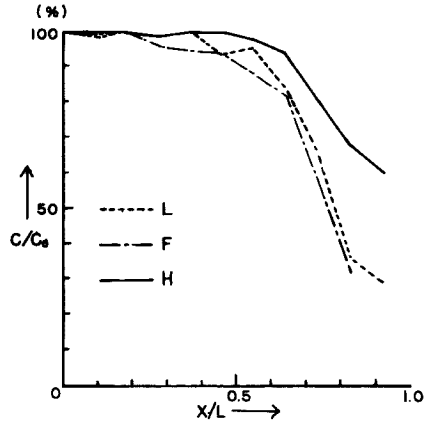


Fig. 17 Dye concentration versus distance. (present state, $H_1=123$ cm, $M.S.L.=D.L.+88$ cm)

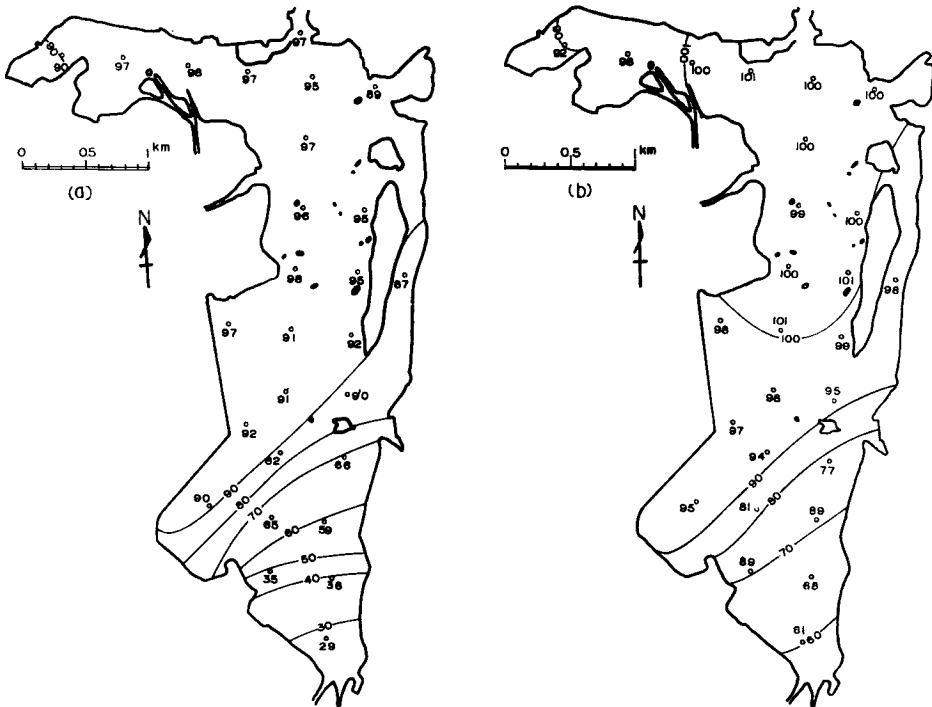


Fig. 18 Horizontal distribution of dye concentration at low water (a) and high water (b). (present state, $H_1=123$ cm, $M.S.L.=D.L.+88$ cm)

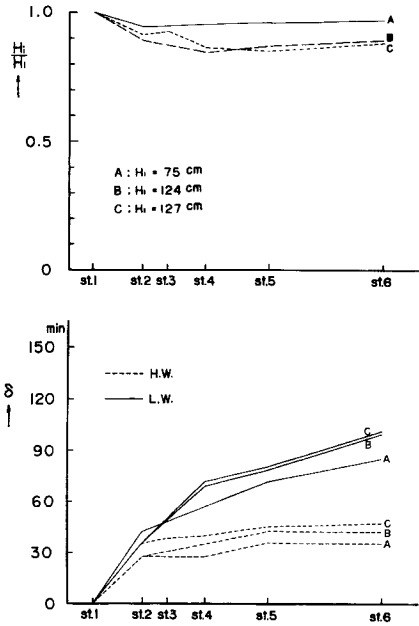


Fig. 19 Ratio of amplitude H_i/H_1 and phase lag δ versus distance. (dredged state)

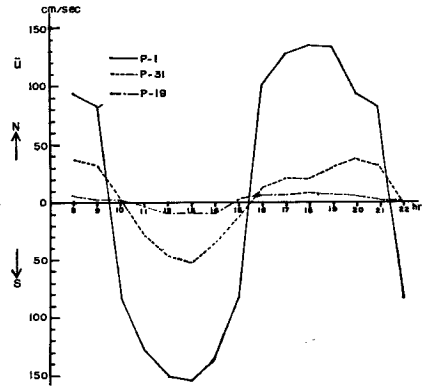


Fig. 20 Time change of velocity of the tidal current. (dredged state, $H_1=124$ cm)

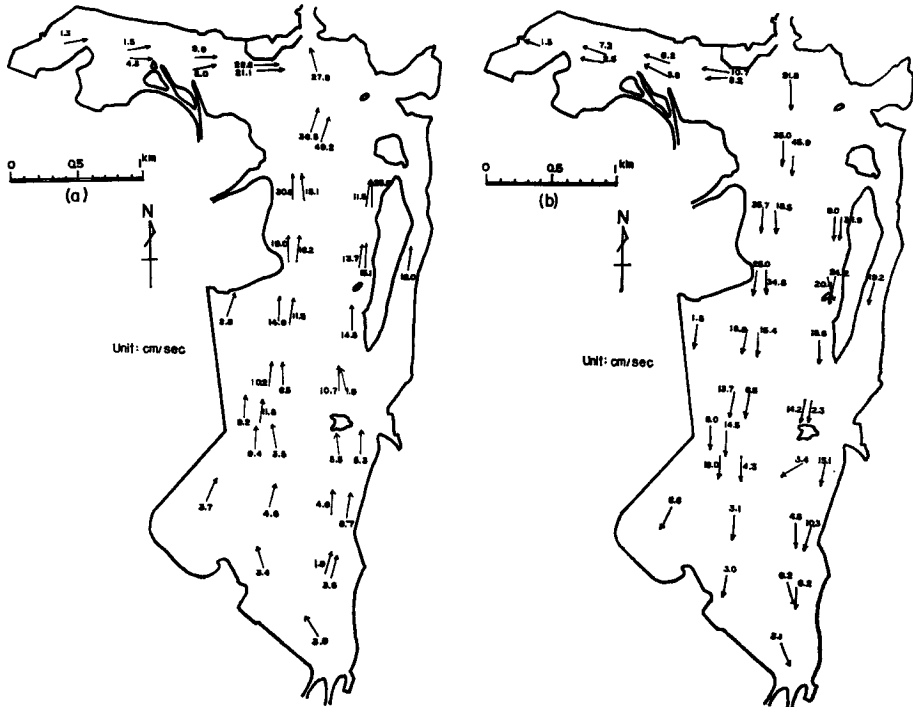


Fig. 21 Flow pattern for maximum ebb current (a) and flood current (b). (dredged state, $H_1=124$ cm)

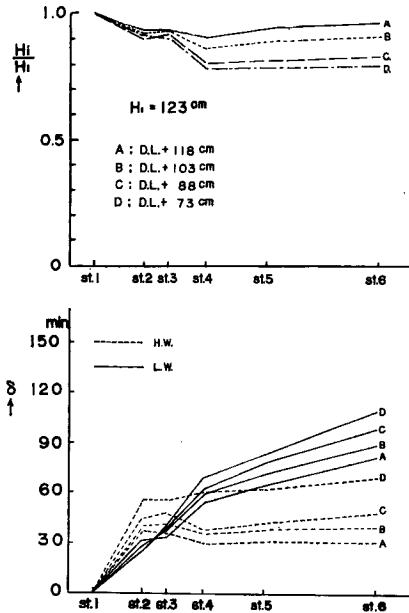


Fig. 22 Effect of mean sea level on the ratio of amplitude H_i/H_1 and phase lag δ . (dredged state, $H_1=123$ cm)

で表わすと Fig. 19 のようである。

図によると、現況の場合と同様に樋口潮差が大きいほど湾内における振幅比は小さくなり、位相差は大きくなるが、全体的に現況より振幅比は大きく、位相差は小さい。

(b) 流速

模型内の P-1, P-31, P-19 の各点での流速の時間的变化は Fig. 20 に示すようである。また、下げ潮時 (a) および上げ潮時 (b) における流速最盛時の流況は Fig. 21 のようである。図は Fig. 13 と同様に平均流速 \bar{u} で示されている。

(c) 平均水位 (M. S. L.) の影響

作渚後における振幅比 H_i/H_1 および位相差 δ に及ぼす平均水位の影響は Fig. 22 のようである。図によると、傾向としては現況の場合と同様に、平均水位が小さく (水深が浅く) なるに従って振幅の減衰が著しく、位相の遅れが大きくなるが、その割合は現況の場合ほど著しくない。

(d) 濃度分布

日下石川より $Q=3.32$ cc/s の河川流量を与えた場合の放流開始後 30 周期目の濃度分布を現況の場合と同様に Figs. 23~26 に示す。Fig. 24 および 26 によると、現況の濃度分布とほぼ同じような傾向が見られるが、湾奥部での等濃度線の傾斜 (東西方向となす角) は、現況に較べてゆるやかになる。また、干潮時には、中州の東側の東水道における濃度の低下が著しい。湾内の濃度勾配をみると、干潮時にゆるやかで満潮時に急になっている。両者を比較すると湾口潮差の大きい場合 (Fig. 26) の方が同じ濃度を示す等濃度線は湾奥に近づいている。

7. 考察

7.1 潮汐

(a) 現況の潮汐

Fig. 4 から明らかのように、湾内における振幅比および位相差には、湾口潮差 (振幅) が大きく影響す

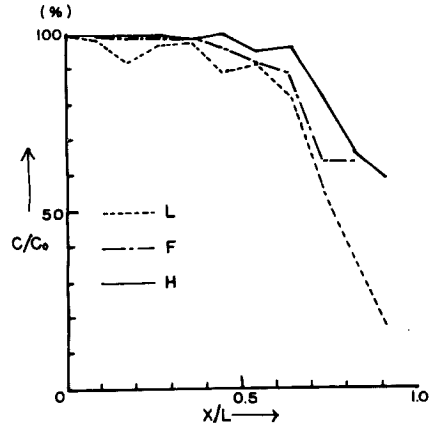


Fig. 23 Dye concentration versus distance. (dredged state, $H_1=74$ cm, $M.S.L.=D.L.+102$ cm)

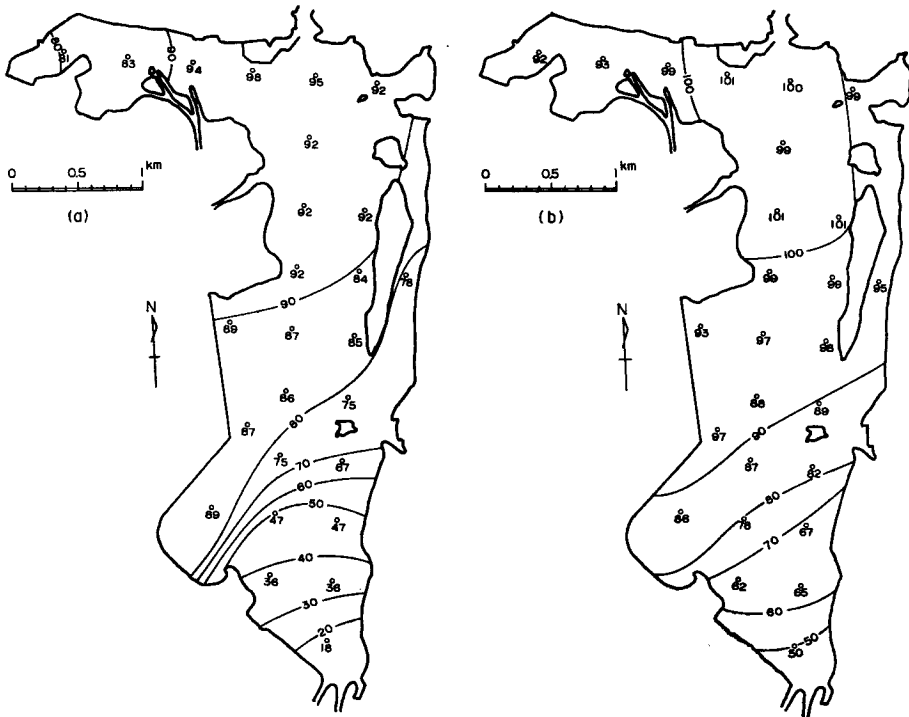


Fig. 24 Horizontal distribution of dye concentration at low water (a) and high water (b). (dredged state, $H_1=74$ cm, $M.S.L.=D.L.+102$ cm)

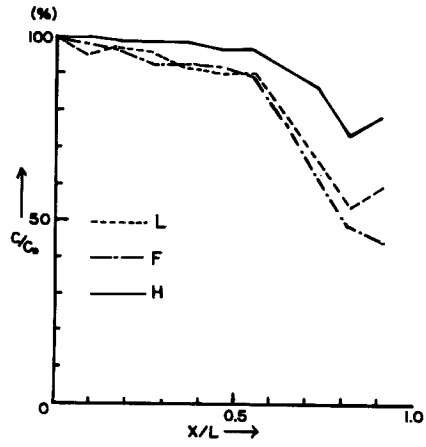


Fig. 25 Dye concentration versus distance. (dredged state, $H_1=123$ cm, $M.S.L.=D.L.+88$ cm)

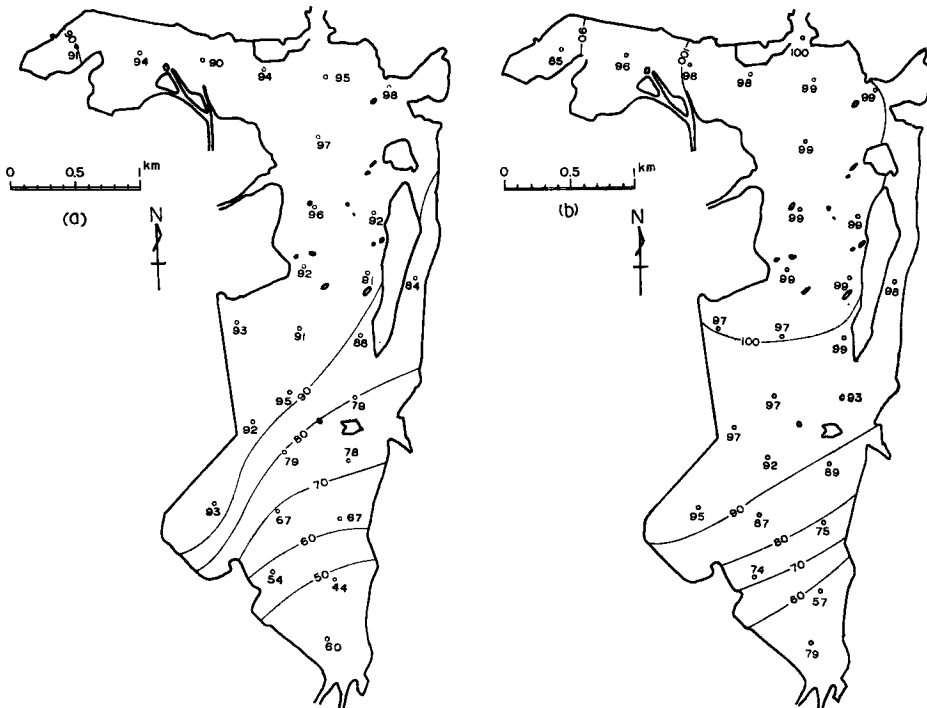


Fig. 26 Horizontal distribution of dye concentration at low water (a) and high water (b). (dredged state, $H_1=123$ cm, $M.S.L.=D.L.+88$ cm)

る。すなわち、湾口潮差が大きいほど、振幅比は小さく、位相の遅れは大きくなる。松川浦では、潮差と水深と同程度の大きさであるため、非線型の影響を受けやすいが、潮差が大きいほどその影響を大きくうけるためこのような現象がみられると考えられる。

日潮不等のある場合には、原型と同じ形の潮汐を模型に与えて実験を行なうことが望ましいが、施設の関係上そのように出来ないで、単一の波の繰り返しで潮汐を近似しなければならない。この場合、周期としては M_2 潮の周期 (12 時間 25 分) を採用してよいと考えられるが、潮差をどのように考えるかが問題となる。というのは、実験資料を原型と比較する場合に、原型の潮差として、調和分解した値を用いるか、生の値 (相つぐ干満の差) を用いるかによって、相似性の判断が異なるからである。ここでは非線型の効果が大いから、むしろ生の値を使う方が、よりよく近似できるものと考え、湾口における原型の潮汐として、相つぐ干満の差を潮差とする、12 時間 25 分周期の正弦波を想定した。

湾内各点における潮位の時間的变化が Fig. 10 (a) に示されているが、これによると現況では奥に進むにつれて、前面 (干潮からつぎの満潮まで) が急に、後面 (満潮からつぎの干潮まで) がゆるやかになり、変形する様子がよくわかる。これは明らかに非線型の効果であり、Fig. 3 に示す原型の曲線と比較すると、形も大きさもよく似ているといえる。

湾内における振幅比と位相差に及ぼす湾口潮差の影響を最奥部の St. 6 について示すと、Fig. 27 のようである。原型の値と、現況の模型の値とを比較すると、各潮差ともかなりよく一致しているといえる。このことから、潮汐に関する相似性は成り立っていると考えられる。

Fig. 3 によると原型では満潮位の不同がみられるが、これは多分、原型の潮位観測基準面の測量誤差に基づくものであろう。模型ではそのような傾向はみられない。

(b) 作滞後の潮汐

作滞後の潮位の時間的变化は、Fig. 10 (b) に示されているが、現況と比較すると変形はかなり少なくなっている。これは、水深増大により摩擦効果が減少したことに基づくものであろう。

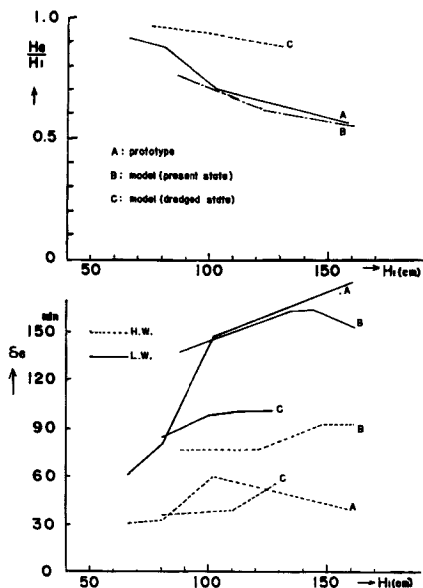


Fig. 27 Effect of amplitude on the ratio of amplitude H_i/H_1 and phase lag δ at st. 6.

振幅比と位相に関しては、Fig. 19 に示されているが、この図からわかるように、現況にくらべて振幅比は大きくなり、位相差は小さくなる。各測点における振幅比と位相差に及ぼす湾口潮差の影響は、Fig. 27 に示されているが、この図からも、作滞後は潮差があまり小さくならないことがわかる。これは作滞により、通水がよくなることに起因するものと考えられる。

7.2 流況

(a) 現況の流速

流速に関しては、原型の資料が乏しいので細かい点までは比較しにくい。

模型では、潮汐は再現されているから、連続の条件から考えて、断面平均流量については、相似性が成り立っていると考えられる。しかし、模型には、人工粗度として多くの金網が使用されているから、流速の鉛直分布はかなり歪められている可能性がある。この点については後〔付録(2)〕に述べる。

流速の時間的変化が Fig. 11 に示されているが、この図と原型の流速の時間的変化 (Fig. 5) とを比較すると、ほぼ流速についても相似が成り立っていると考えられる。Fig. 13 の最盛期の流況を見ると、一般に上げ潮(南流)が下げ潮(北流)より大きい。この傾向は、さきに述べた潮候曲線の変形に対応しているものである。

(b) 作滞後の流況

作滞後の流速の時間的変化は Fig. 20 に示されているが、これによると、各測点とも下げ潮から上げ潮への転流時は現況の場合より早くなり、湾口(P-1)での流速は、下げ潮、上げ潮とも現況より大きくなっている。これは、作滞による湾内への流入量の増加に対応するものである。

流況は Fig. 21 に示されているが、この図と Fig. 13 とを比べると、最盛時における上げ潮と下げ潮との流速の差は、現況の場合よりも小さくなるのがわかる。これは、潮汐の変形が少なくなったことに対応している。

また、Fig. 20 に示される作滞後の流速の時間的変化からもわかるように、現況の流速にくらべて上げ潮時には、湾口付近で大きくなるが、奥部では小さくなり、全体として上げ潮時には現況の流速の 90% 程度になり、下げ潮時には、107% 程度となる。滞の内外の流速は大きく異なり、上げ潮時には、滞の内部では外側の約 170% 下げ潮時には約 150% と大きくなっている。

7.3 平均水位の影響

振幅比と位相差に及ぼす平均水位の影響は Fig. 14 (現況) と Fig. 22 (作滞後) とに示されているが、これらを比較すると、いずれも平均水位が低く(水深が浅く)なるにしたがって、振幅比 H_2/H_1 は、小さくなり、位相差 θ は大きくなる。原型では、Fig. 2 に見られるように、冬季には平均水位が低く、水深が浅くなるため、海底摩擦の影響をより大きくうけ減衰が著しくなると考えられる。そのうえ、冬季には、湾内に立てられる多数のノリヒビが、流れに抵抗を与え、この傾向を一層大きくするものと考えられるが、実験ではノリヒビの効果を入れていないため定量的には、どの程度の影響があるかは、よくわからない。

7.4 濃度分布

(a) 現況の濃度分布

ウランで着色された外海水は、潮汐によって湾内進入し、混合・拡散するが、潮流の主方向は南北にあるため、染料水はこの方向に拡散しやすい。南北方向の濃度の時間的変化は Fig. 15 および 17 に示されているが、この図から明らかに、湾口より 3~4 km ($x/L=0.5\sim0.65$) の所で濃度の急激な低下が見られるが、このことから、湾口から 3~4 km までが、外海水の第 1 次影響域と考えられる。これを Fig. 6 に示される原型の塩分分布と比較すると、模型ではその範囲が多少広がっているようである。これは、人工粗度により鉛直 shear が強調された結果かも知れない。

Fig. 16 および 18 に示された湾内の濃度分布から明らかのように干潮時、満潮時ともに、湾中央から奥部へかけての等濃度線は、北東~南西に傾いている。この傾向は、Fig. 7 に示された原型のものともよく一致している。これは上げ潮時には、高濃度の水が、主に湾の西側から入り込み、下げ潮時には、湾奥

の低濃度の水が、東側を通過して流れ出ることを示していると考えられる。

Fig. 13 によると、湾奥部においては流速は常に西側の方が大きい、上げ潮時にはこの傾向が強く、下げ潮時には弱まり、全体として反時計廻りの環流が存在することが推定されるが、上に述べた濃度分布は、この流れに対応するものであろう。

ここに示されている 2 つの例について、原型と同様の方法で拡散係数を求めてみる。 $H_1=74$ cm (以下カッコ内は $H_1=123$ cm の場合) に対応するフラッシュ係数は $F=0.15(0.10)$ となり、 $D=3.32$ cm²/sec, $h=2.76(2.48)$ cm, $T=527$ sec, $\xi_0=0.68(1.0)$ cm, $V=4.3(3.86)\times 10^5$ cm³, $u_0=1.27(1.81)$ cm/sec, $\zeta_0=210(300)$ cm であるから、(2.1) 式から、 $B=0.036(0.022)$ となり、(2.2) 式から $A_m=19.20(23.89)$ cm²/sec となる。これを (3.9) 式により原型の値に換算すると $A_p=0.81(1.0)\times 10^5$ cm²/sec となる。これらは、2 で述べた値とほぼ一致している。このことから、第 1 次影響域の大きさには多少問題はあるけれども、湾内の拡散現象についても、かなり再現性があるように思われる。

(b) 作滞後の濃度分布

作滞後の濃度分布は **Fig. 24** に示されているが、**Fig. 16** に示された現況での濃度分布と比較すると、湾中央部における濃度は、下げ潮時に低く、上げ潮時には高くなっている。

また、湾奥部での濃度の水平勾配にはさほど大きな違いはみられないが、等濃度線の傾きは現況に於けるよりも、むしろゆるやかになっている。

これらのことは、**Fig. 21** の作滞後の流況からわかるように、作滞を行なうことによって、潮流は主として滞に沿って強くなるため、滞方向の混合が強まったことを意味する。

また、**Fig. 13** および **16** と、**Fig. 21** および **24** とを比較すると作滞後には、湾奥部での反時計廻りの渦は、現況ほどははっきりみとめられなくなっている。

$H_1=123$ cm ($M.S.L.=D.L.+88$ cm) に対しては、等濃度線の傾きは、 $H_1=74$ cm の場合よりも急になっており、とくに干潮時に著しい。これは、潮差が大きくなり、流速が速くなると、作滞後も、湾奥部の東側と西側での流速の差が現われるため、現況でみられた反時計廻りの渦が、発生するためと考えられる。

作滞後の拡散係数を試算すると、 $H_1=74(123)$ cm の場合、**Fig. 23(25)** の濃度分布から $F=0.09(0.08)$ となる。さらに、 $D=3.32$ cm²/s, $h=2.80(2.52)$ cm, $T=527$ sec, $\xi_0=0.74(1.08)$ cm, $V=4.40(3.82)\times 10^5$ cm³, $u_0=1.36(1.94)$ cm/s, $\zeta_0=230(330)$ cm であるから (2.2) 式より $A_m=28.25(30.73)$ cm²/s となる。これらを (3.7) 式を用いて、原型の値に換算すると、 $H_1=74(123)$ cm に対して、 $A_p=1.19(1.29)\times 10^5$ cm²/s となる。

以上のように現況および作滞後の拡散係数を試算した結果、 $H_1=74$ cm に対しては、作滞後には、現況の約 1.5 倍となり、 $H_1=123$ cm では約 1.3 倍となる。しかしながら、この計算では地形の複雑な松川浦を、一様な長方形水路とみなしているから、ここに得られた拡散係数については、なお検討の余地があると思われる。

このことは、作滞によって水の通りがよくなり、外海水が現況よりも奥まで入りやすくなることを意味する。

8. あとがき

松川浦の潮汐および潮流に関して、水平縮尺 1/600、鉛直縮尺 1/50 の歪み模型を用いて実験を行なった結果、つぎのことが明らかになった。

- (1) 金網を人工粗度として用いることによって湾内の潮汐・潮流はかなりよく再現できる。
- (2) 湾内での濃度分布は、満潮時には、湾口から 3 km あたりまでほぼ一様となり、それ以遠では、急激に減少する。湾奥では、湾口濃度の約 50% 程度となる。満潮時、干潮時とも湾奥部での等濃度線は北東～南西に傾く。

現況における湾内の時間及び空間平均の水平拡散係数は約 $0.8\sim 1.0\times 10^5$ (cm²/sec) と推定される。

(3) 作渚によって通水がよくなり、湾奥では潮汐は現況ほど減衰しなくなり、位相差は小さくなる。さらに、上げ潮と下げ潮の持続時間の差は現況より縮まり、流速は全体として約1割程度上げ潮時に小さく、下げ潮時に大きくなる。渚の中では流れは強く、外では弱い。その比は、上げ潮時には約170%、下げ潮時には約150%である。

(4) 作渚後の湾内の濃度分布は、現況に比べると等濃度線は、多少、満潮時には奥まで進み、干潮時には逆に、湾口に近くなる。とくに渚付近では、その効果が強く現れる傾向がある。作渚後の拡散係数は、 $1.2 \sim 1.3 \times 10^5 (\text{cm}^2/\text{sec})$ と推定される。

以上限られた条件の下での実験結果について述べたが、混合・拡散現象に関しては、原型との間に多少の差異が認められた。これは人工粗度として金網を数枚重ねて使用したため、流速の鉛直 shear が大きくなっているためと考えられるが、このような場合の混合・拡散現象に関する実験の適用性や限界などについては今後の研究課題としたい。

終りにあたって、実験および資料整理に協力して頂いた北川吉男氏、川崎博一氏、ならびに神谷キミヨ嬢に感謝の意を表する。なお、この研究の一部は福島県水産課の委託によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 福島県：松川浦浅海漁場開発事業調査報告書，昭41.3.
- 2) 同上，そのII，昭42.3.
- 3) 同上，そのIII，昭43.3.
- 4) 同上，そのIV（総括編），昭44.3.
- 5) 福島県水産試験場：松川浦観測資料，福水試調査研究資料，No.84，昭44.3.
- 6) Arons, A.B. and H. Stommel: Amixing Length Theory of Tidal Flushing, Trans. A.G.U., Vol. 32, No. 3, June 1951, pp. 419-521.
- 7) 樋口明生：潮流の水理模型実験，水産土木，Vol. 6, No. 1, 昭44.
- 8) Ippen, A.T.: Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, 1966, pp. 698-700.
- 9) 気象庁：昭和45年度潮位表，昭44.11.

付 録

(1) 摩擦係数について

本実験においては、Fig. 9 に示すように人工粗度として、金網を数枚重ねて使用したため、流速の鉛直 shear が大きくなっていると考えられる。実験では、表面流速を測定したが、平均流速を求めるために、それらの関係を明らかにしておかねばならない。このため同じ金網について直線水路で定常流に関する実験を行なった。この場合開水路不等流の公式

$$dh/dx = (Q^2/C^2RA^2) / \left(1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \cdot \frac{dA}{dh}\right) \dots\dots\dots (\text{付. 1})$$

が成り立つものと考え、 $\alpha=1$ として C を

$$C = 1/n \cdot R^{1/6} \dots\dots\dots (\text{付. 2})$$

で置き換えて、 $R=h$ とすると、

$$n = 1/v \cdot I^{1/2} h^{2/3} (1 - F_r^2)^{1/2} \dots\dots\dots (\text{付. 3})$$

となる。これは I と v を測定して n を決定した。ここに、 $I=dh/dx$ 、 $v=Q/dA$ 、 A は水路の断面積、 Q は流量、 h は水路底面からの水深、 n は Manning の粗度係数、 C は Chezy の摩擦係数である。

こうして求めた n から、次式を使って、抵抗係数 f を求めた。

$$f = \frac{2gn^2}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (\text{付. 4})$$

結果を Fig. 28 に示す。ここに、 d は、金網を何枚か重ねた場合の厚さである。

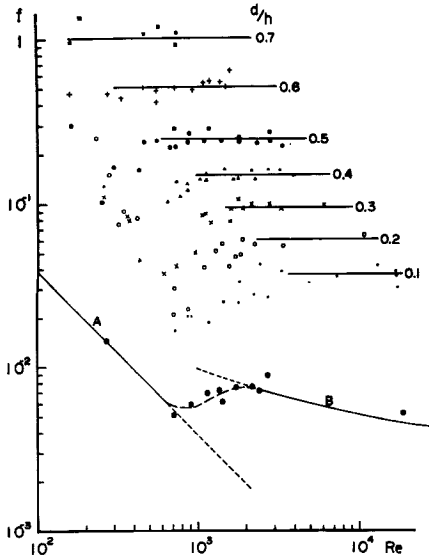


Fig. 28 Friction factor for the wire net.

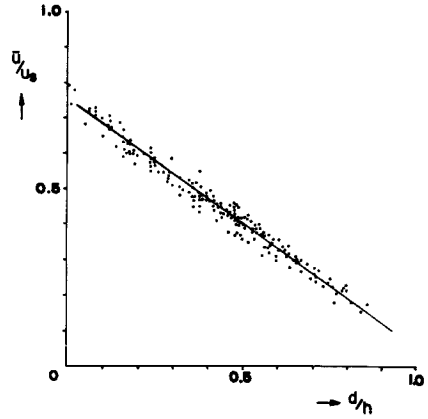


Fig. 29 Relation between the ratio of mean velocity to surface velocity and relative height of artificial roughness.

図中の直線Aは、Nikuradse が砂粒粗度を用いて求めた層流域 ($Re < 500$) に関するもので、 $fRe=4$ で与えられる。曲線Bは、同じく Nikuradse の実験での滑面に対する乱流の抵抗係数 f を示す。

図によると、一定の d/h に対して、乱流領域では f は Re に無関係になり、一定の値をとるようになる。この図から、模型全体の平均流速と金網の平均枚数とから湾内の平均抵抗係数 f を決めることができる。

湾内の平均流速を $\bar{u}=12.1\text{cm/sec}$ 、金網の平均枚数を $m=4\sim 5$ ($d=0.96\sim 1.20\text{cm}$)、平均水深 $h_m=2.48\text{cm}$ とすると、 $d/h=0.38\sim 0.48$ 、 $Re=3\times 10^3$ となり、 $f_m=0.16\sim 0.22$ となる。

(付. 4) 式により n にあおすと、 $n_m=0.049\sim 0.057$ となり、(3.5) 式によって換算すると、原型の粗度係数は $n_p=0.027\sim 0.032$ となる。この値は、2 で述べたものより 2 割程度小さい。

ここでは、用いた金網の枚数に関係なく、水路底から水面までの高さを水深としているが、枚数の増加とともに基準面を上にあげる方がよいのかも知れない。この点に関しては今後検討を加えたい。

(2) 平均流速と表面流速との関係

模型における相似則は、鉛直に平均した流速について成り立つものであるが、本実験で測定したのは表面流速である。模型内には、Fig. 6 に示したように、多くの金網を敷いてあるため、表面流速と鉛直に平均した流速とがかなり異なるから、その補正をしなければならない。このため、模型に使用したものと同規格の金網について、別途に直線水路で定常流に関する実験を行なった。その結果を Fig. 29 に示す。

この図は、パラメーターとして d/h を用いて、平均流速 $\bar{u}(=Q/A)$ と表面流速 u_s との比を示したものである。ここに、 d は金網を重ねた時の厚さ、 h は水路底面よりとった水深、 Q は流量、 A は断面積を示す。

この図から、 d/h と \bar{u}/u_s との間にはほぼ一次関係が成り立つことがわかり、次式のような関係が得られた。

$$\bar{u}/u_s = -0.7(d/h) + 0.75 \dots\dots\dots (付. 5)$$

本文に示した流速はすべてこの関係を用いて補正したものである。