

# 松川浦における潮流の水利模型実験について

樋口 明生\*・辻 正明\*\*

## 1. ま え が き

松川浦は、福島県北部に位置し、細長い水道（長さ約500 m、幅約60 m、水深約4 m、最小通水断面積219 m<sup>2</sup>）によって太平洋に通ずる周囲20.5 km、水面積6.46 km<sup>2</sup>の袋状の内湾である（図-1）。

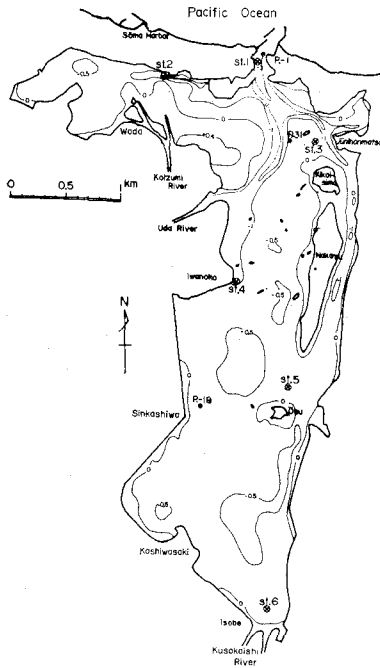


図-1 松川浦の深淺図

ここは県下唯一の浅海養殖漁場であるが、現状では海水交流の盛んな湾口付近では漁獲量が多いが、交流の悪い湾奥部ではきわめて少ない。そこで、作渚を行なうことによって湾内の海水交流を促し、漁場を拡張するとともに、生産性を向上させようとする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る、このため、水平縮尺1/600、鉛直縮尺1/50の模型を用いて、作渚による湾内の海水交流の変化を実験的に求めた。

\* 正会員 理博 京都大学助教授 防災研究所

\*\* 公害資源研究所

## 2. 原 型

現地ではこの作渚計画を実施するに先立ち、昭和40年度よりいろいろな調査が行われてきた<sup>1)~5)</sup>。

湾口を含む湾内5カ所における検潮記録によると、湾内の旬平均潮位は3月に低く、9月に高く、その差は約30 cmで、湾内平均水深の約1/4に相当する。湾口検潮所における各分潮の振幅は  $K_1=18.66$  cm,  $O_1=18.91$  cm,  $S_2=19.36$  cm,  $M_2=26.41$  cmで、潮型示数は  $F=0.86$  となり、潮汐は準半日周潮型である。湾口を基準とした湾内各点での振幅比 ( $H_i/H_1$ ) および位相差 ( $\delta$ ) を図-2に示す。

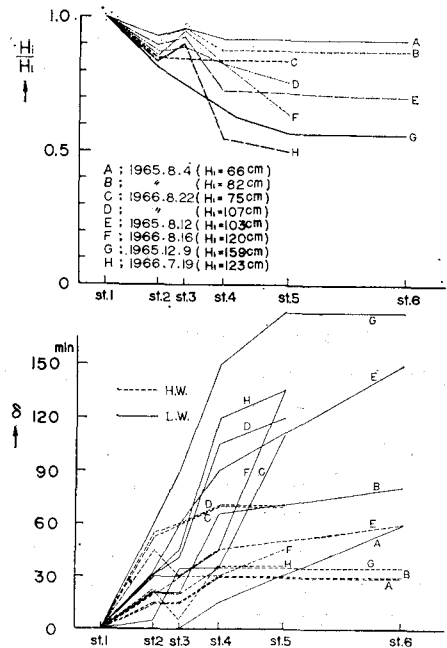


図-2 湾内における潮汐の振幅比 ( $H_i/H_1$ ) と位相差 ( $\delta$ ) (原型)

図は相次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、湾口における湾差が大きいほど湾内でよく減衰することがわかる。

湾内の塩素量の時間的変化および塩素量の水平分布は

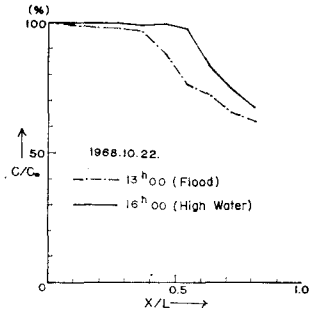


図-3 塩素量の時間的变化(原型)

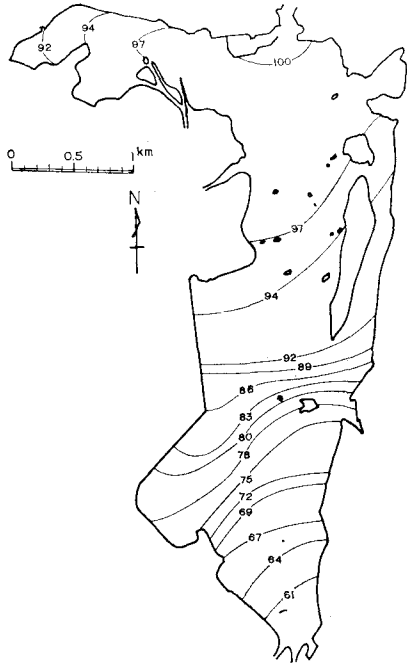


図-4 塩素量の水平分布(原型)

図-3、図-4 に示すようである。当日の潮差は 74 cm で、16 時の線がほぼ満潮時の状態を表わしている。図によると、満潮時には湾口から 3 km ( $x/L=0.5$ ) 以遠で、塩素量の急激な減少がみられるが、これが外海水の第一次影響域を示していると考えられる。

松川浦のような地形の海域においては、適用性について多少問題はあるが、Arons-Stommel<sup>6)</sup> の概念にしたがっ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  $K$  は次のように表わされる。

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

$$K=2B\xi_0u_0 \dots\dots\dots (2.2)$$

$D$  は河川流量、 $h$  は水深、 $\xi_0$  は潮汐の振幅(半潮差)、 $T$  は周期、 $V$  は estuary の全容量、 $2\xi_0$  は最大流動距離、 $u_0$  は最大流速である。図-3 に示された塩素量分布から、フラッシュ係数は  $F=0.14$  となり、当日の条件 ( $D=7\times 10^5$  m<sup>3</sup>/sec、 $h=137$  cm、 $T=4.47\times 10^4$  sec、 $\xi_0=37$  cm、 $V=8\times 10^{12}$  cm<sup>3</sup>、 $u_0=9.0$  cm/sec、 $\zeta_0=1.28\times 10^5$

cm) と式 (2.1) から  $B=0.036$  となる。さらに式 (2.2) より拡散係数は  $K=0.9\times 10^5$  cm<sup>2</sup>/s となる。

3. 相 似 性

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ひずんだ 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次のようである<sup>7)</sup>。

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

$$n_r=x_r^{-1/2}h_r^{2/3} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに  $x$  および  $h$  は水平および鉛直方向の長さ、 $t$  は時間、 $n$  はマンニングの粗度係数、添字  $r$  は原型の量と模型のそれとの比を表わす。式 (3.1) は Froude の相似則であり、式 (3.2) 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。

一般に模型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<sup>8)</sup> から、模型内の水深は 1 cm 以上必要であるといわれている。したがって鉛直縮率は 1/124 以上でなければならないが、数種の鉛直縮尺について試算した結果によると、模型に与えるべき相当粗度は模型の平均水深よりも大きくなり、摩擦抵抗としての意味をなさないので、ここでは通常的人工粗度の代りに、より大きい抵抗を与えると期待される金網を用い、その枚数を試行錯誤的に調節することにより相似の条件を見出せるものと考えた。

拡散現象には種々の周期の乱れが関与しているが、潮汐に関する相似が成り立っており、潮汐周期の乱れによる拡散現象についても相似が成り立つと考えられる。水平拡散係数の縮率は次のようである。

$$K_r=x_r^2t_r^{-1}=x_rh_r^{1/2} \dots\dots\dots (3.3)$$

$x_r=600$ 、 $h_r=50$  とした場合の模型の諸元を表-1 に示す。

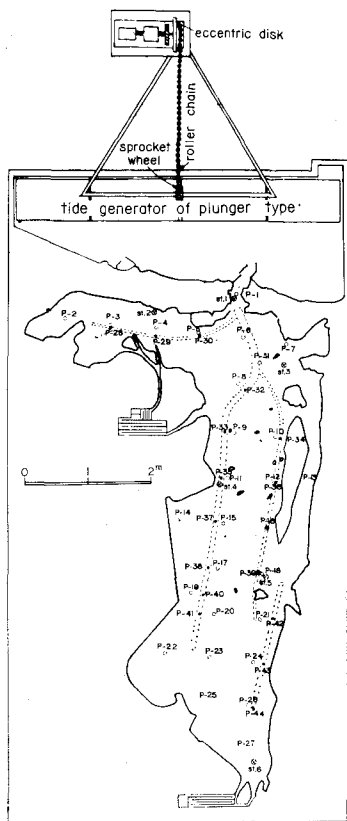
表-1 模 型 諸 元

|         | 縮 尺                 | 原 型                         | 模 型                                 |
|---------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 距 離     | 1/600               | 3.0 km                      | 5.0 m                               |
| 水 深     | 1/50                | 100 m                       | 2.0 cm                              |
| 潮 差     | 1/50                | 150 cm                      | 3.0 cm                              |
| 周 期     | 1/84.8              | 12 h 25 m                   | 8 m 47 sec                          |
| 流 速     | 1/7.07              | 20.0 cm/sec                 | 2.8 cm/sec                          |
| 流 量     | $1/2.12\times 10^5$ | 1.0 m <sup>3</sup> /sec     | 4.71 cm <sup>3</sup> /sec           |
| 拡 散 係 数 | $1/4.2\times 10^8$  | $10^5$ cm <sup>2</sup> /sec | $2.4\times 10$ cm <sup>2</sup> /sec |

4. 実験施設

(1) 模型水槽

松川浦全域の模型を図-5 に示す。水槽の大きさは  $5.4\times 11$  m である。模型内には人工粗度として金網(規格は #20×8'') が数枚重ねて敷きつめられている。作渚



図—5 模型平面図

予定線は図—5 に破線で示されている。

## (2) 起 潮 機

模型に潮汐を与えるために、幅 5.4 m、容積約 1 m<sup>3</sup> のプランジャー式起潮機を用いた (図—5 参照)。この起潮機によって、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。

## (3) 計 測 装 置

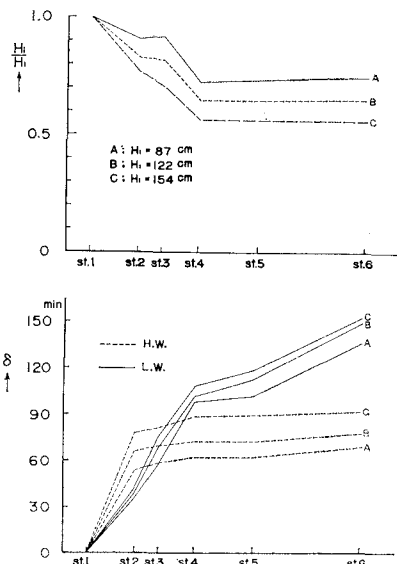
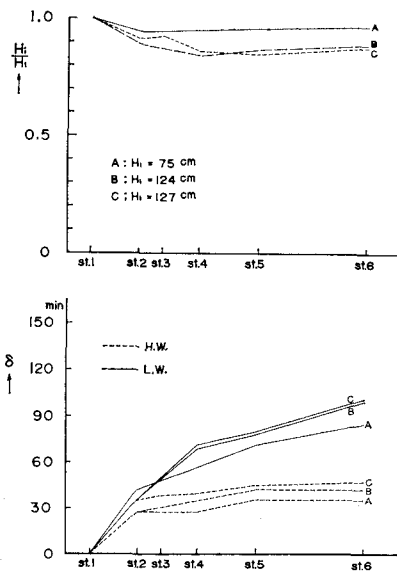
水位は図—1 に⊗印で示される 6 点で、電気抵抗式水位計により測定した。流速は浮標追跡により求めた。

湾内の染料濃度は模型内の P-1 から P-27 の 27 点で採水して、蛍光光度計により測定した。

## 5. 実験経過と結果

本実験では半日周期のみを取り扱った。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。このような人工粗度を用いて、現況に関する検証実験を行ない、潮汐に関する相似性を確認したのち作滞を行ない、数種の振幅の正弦波を与えて実験を行なった。

湾口を基準とする振幅比 ( $H_i/H_1$ ) と位相差 ( $\delta$ ) は、図—6 (現況)、図—7 (作滞後) のようである。図—6 に

図—6 振幅比 ( $H_i/H_1$ ) と位相差 ( $\delta$ ) に及ぼす湾口潮差 ( $H_1$ ) の影響 (現況)図—7 振幅比 ( $H_i/H_1$ ) と位相差 ( $\delta$ ) に及ぼす湾口潮差 ( $H_1$ ) の影響 (作滞後)

よると、振幅が大きいか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のがわかる。この傾向は作滞後 (図—7) についても同様であるが、全体的に現況より振幅比は大きく、位相差は小さくなる。

湾内における拡散に関しては、ウラニンで着色された外海水は潮流によって湾内へ流れ込み拡散するが、模型には sink がないため定常状態は実現しない。したがって、湾内各点における濃度の増加率が一定値を下まわった状態を疑似定常状態とみなし、その時の湾内の濃度分布から拡散係数を求めた。この場合、湾奥の日下石川の

河川流量は  $3.32 \text{ cc/sec}$  とした。これは日下石川の平均流量  $0.7 \text{ m}^3/\text{sec}$  に相当する。なお模型では、湾内容積に比べて外海容積が小さいため、外海水の濃度低下が起こりやすいので、これを防ぐために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。また、湾内における塩素量分布は、湾内潮差および平均水位によって異なると考えられるが、ここでは比較的原型の資料の整っている場合（湾口潮差  $74 \text{ cm}$ ）をとりあげた。

実験開始後 30 周期目で疑似定常状態に達したが、その時の濃度分布を図-8, 9（現況）、図-10, 11（作滞後）に示す。図-8 によると、現況については、外海水の第

一次影響域が湾口より  $3 \sim 4 \text{ km}$  あたりまでで、それ以外で濃度の急激な低下がみられ、湾奥では、干潮時に湾口濃度の  $50\%$  以下となる。作滞後の濃度分布にも同様な傾向がみられるが、図-9 と図-11 とを比較すると、湾奥部での等濃度線の傾斜（東西方向となす角）は、現況に比べてゆるやかになる。また作滞後の干潮時には、中州の東側の東水道の濃度低下が著しい。湾内の濃度勾配は、干潮時にゆるやかで満潮時に急である。

## 6. 考 察

### (1) 潮 汐

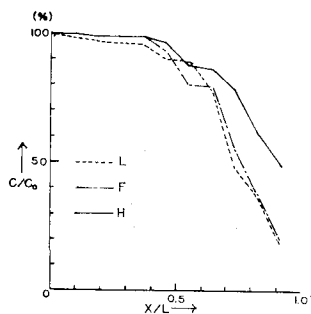


図-8 染料濃度の時間的変化（現況）

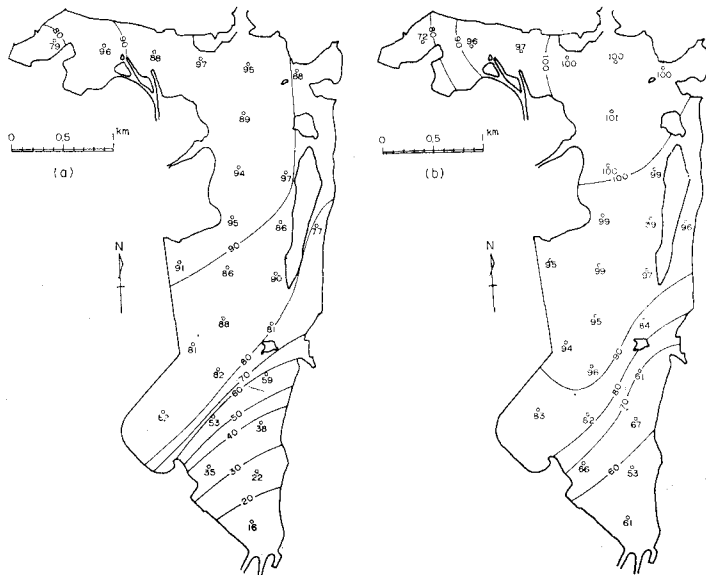


図-9 染料濃度の水平分布（現況）(a) 干潮時 (b) 満潮時

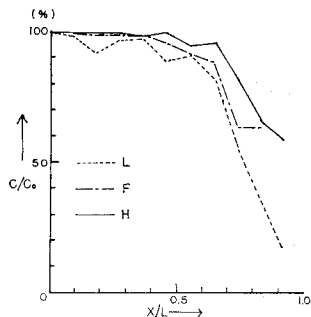


図-10 染料濃度の時間的変化（作滞後）

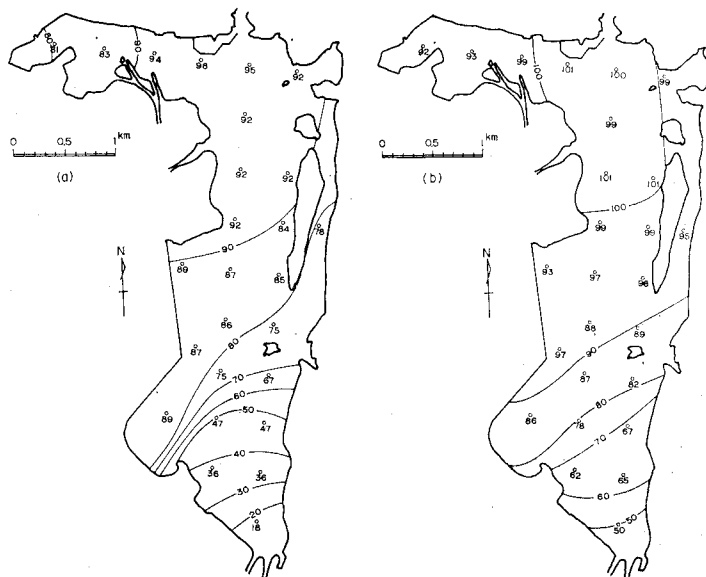


図-11 染料濃度の水平分布（作滞後）(a) 干潮時 (b) 満潮時

図-2 から明らかなように、湾内における振幅比および位相差には、湾口潮差（振幅）が大きく影響する。湾口潮差が大きいほど振幅比は小さく、位相の遅れは大きい。松川浦では、潮差と水深が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受けるため、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再現することが望ましいが、施設の関係上それができないので、実験は正弦波で行なった。この場合、上に述べたような非線型の効果からみて、振幅として調和分解の結果を用いるよりは、むしろ相次ぐ干満の差を全振幅とみなすほうがよりよく近似できると考えた。

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 St. 6 について示すと、図-12 のようである。

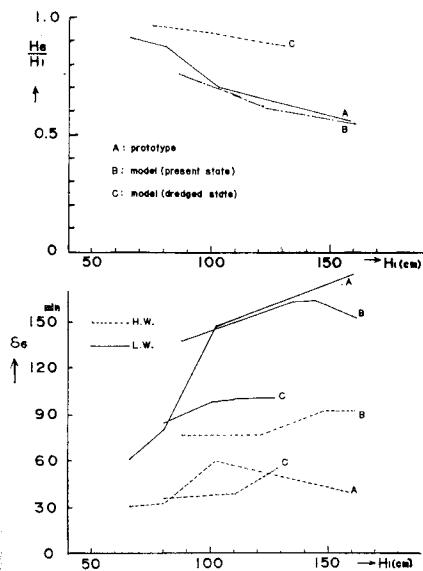


図-12 St. 6 における振幅比 ( $H_0/H_1$ ) と位相差 ( $\delta_0$ ) に及ぼす湾口潮差 ( $H_1$ ) の影響

原型の値と模型の値とを比較すると、各潮差ともかなり良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つと考えられる。作滞後の振幅比と位相に関しては図-7 に示されているが、図-6 と比較すればわかるように、現況に比べて振幅比は大きくなり、位相差は小さくなる。これは作滞により、水深が増大し、摩擦効果が減少し、通水が良くなったことに基づくものと考えられる。

## (2) 濃度分布

ウランに着色された外海水は、潮汐によって湾内へ進入し、混合・拡散するが、潮流の主方向が南北であるため、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が図-8 に示されているが、これによる

と湾口から 3~4 km ( $x/L=0.5\sim0.65$ ) まだが外海水の第一次影響域と考えられる。これを原型の塩分の時間的変化(図-3)とを比較すると、模型では多少奥まで入り込んでいるようである。これは人工粗度により鉛直 shear が強調された結果であろう。

模型の濃度分布(図-9)をみると、干潮時、満潮時ともに湾中央から奥部では、等濃度線が北東~南西に走り、湾軸に直角の方向から傾いている。この傾向は原型(図-4)と良く一致している。このような等濃度線の傾きは、この付近に存在する左回りの環流のために上げ潮時に、高濃度の水が主に湾の西側から入り込み、下げ潮時に、湾奥の低濃度の水が東側を通して流れ出ることを示していると考えられる。

一方作滞後の濃度分布(図-11)を見ると、湾中央部における濃度は現況に比べて下げ潮時に低く、上げ潮時に高くなっている。また、湾奥部での等濃度線の傾きは、現況よりもゆるやかになっている。これは、作滞によって湾奥部の環流が弱まったことによるものであろう。

次に染料の濃度分布から、原型と同様の方法で湾内の水平拡散係数を求めてみる。現況(作滞後)に対して  $H_1=74$  cm に対応するフラッシュ係数は  $F=0.15(0.09)$  となり、実験条件は  $D=3.32$  cc/sec,  $h=2.76(2.80)$  cm,  $T=527$  秒,  $\xi_0=0.68(0.74)$  cm,  $V=4.3(4.4)\times 10^5$  cm<sup>3</sup>,  $u_0=1.27(1.36)$  cm/sec,  $\zeta_0=210(230)$  cm, であるから、式(2.1)から  $B=0.036(0.050)$  となり、式(2.1)から  $K_m=19.20(31.28)$  cm<sup>2</sup>/sec となる。これを式(3.3)により原型の値に換算すると、 $K_p=0.81(1.31)\times 10^5$  cm<sup>2</sup>/sec となる。現況の値は、2. で述べた原型の値に近いから、第一次影響域の大きさに多少問題はあるが、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。

作滞後の拡散係数は  $H_1=74$  cm に対して、現況の約 1.5 倍となり、海水交流が良くなることを示唆している。しかしながらこの計算では、地形の複雑な松川浦を一樣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。

なお使用した人工粗度の平均粗度係数は、別の水路において定常流について求めたところ  $n_m=0.049\sim0.057$  であった。式により原型の値に換算すると  $n_p=0.027\sim0.032$  となる。実験の詳細については省略する。

## 7. 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 のひずみ模型を用いて実験を行なった結果、次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、潮流はかなり良く再現できる。

(2) 湾内での塩分濃度は、満潮時には湾口から3 km あたりまではほぼ一様となり、それ以遠では急激に低下する。湾奥では湾口の約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および空間平均の水平拡散係数は、約  $0.8 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  と推定される。

(3) 作渚により通水が良くなり、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。

(4) 作渚後の湾内の塩分濃度は、現況に比べて満潮時には多少高く、干潮時には低く、特に滞付近ではその傾向が強い。作渚後の拡散係数は  $1.2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  と推定される。

以上限られた条件下での実験結果について述べてきたが、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いただいた北川吉男氏、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，昭和41年3月。
- 2) 同上，そのⅡ，昭和42年3月。
- 3) 同上，そのⅢ，昭和43年3月。
- 4) 同上，そのⅣ，(総括編)，昭和44年3月。
- 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，昭和44年3月，p. 25。
- 6) Arons, A.B. and H. Stommel: A mixing 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, 1969, p. 21.
- 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，昭和44年11月。