

松山港における潮流の水理模型実験

樋口 明生・武岡 英隆・北川 吉男

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE TIDAL CURRENT IN MATSUYAMA HARBOR

By Haruo HIGUCHI, Hidetaka TAKEOKA and Yoshio KITAGAWA

Synopsis

The flow pattern of the tidal current and discharging process of river water affected by it are studied in a hydraulic model experiment, for which the Matsuyama Harbor area is used as the prototype.

A distorted Froude model of Matsuyama Harbor, with horizontal and vertical scales of 1/1000 and 1/100 respectively, was constructed and a semidiurnal tide and tidal current were provided for it.

Clockwise and counterclockwise circulations are formed in the harbor respectively in the flood and the ebb off the harbor. And river water flows out of the harbor mainly in the slack off the harbor. This is due to the shift and the enlargement of the circulation in the slack and its destruction after the slack.

1. まえがき

沿岸海洋における物質の流動拡散過程の研究において、物質供給源の一つである河川からの水の流出過程の問題は、灘規模の現象に対しては境界条件として重要である。この問題に関し、水平地形の効果による河川水の挙動を調べる立場からは、水理実験によっても、しばしばその水平的な拡がり等が扱われているが、流入初期の河川水の挙動を扱った例はあまりない。今回著者らは、このような観点から松山港の水理模型を用いて、港内に流入する河川水が港という中間領域を経て港外へ流出していく過程を明らかにする実験を行った。現在までに得られた結果について以下に報告する。

2. 原 型

松山港は瀬戸内海の伊予灘の北東端に位置し、付近の海域は釣島水道・高浜瀬戸・クダコ水道等の多くの水道群によって北の安芸灘に通じている。これらの水道群を通過する潮流の流速は比較的大きく流況は複雑である。港付近の海図を Fig. 1 に示す。図の中央の島（興居島）と陸岸間の水道が高浜瀬戸であり、この南側の陸岸における長さ 2 km 程度、奥行き 1 km 程度のくぼみが松山港である。港の南半分は防波堤によって外海と仕切られている。

港内の三津浜における潮汐定数を Table 1 に示す。潮型示数 $[F = (H_s + H_o) / (H_m + H_s)]$ (H_s , H_o , H_m , H_s は各々, K_1 , O_1 , M_2 , S_2 各分潮の振幅) は $F=0.38$ となり、半日周潮型に近い混合型であり、小潮時を除いて半日周潮が卓越する。従って本実験では半日周潮に着目し、大潮時・小潮時を通じての平均的

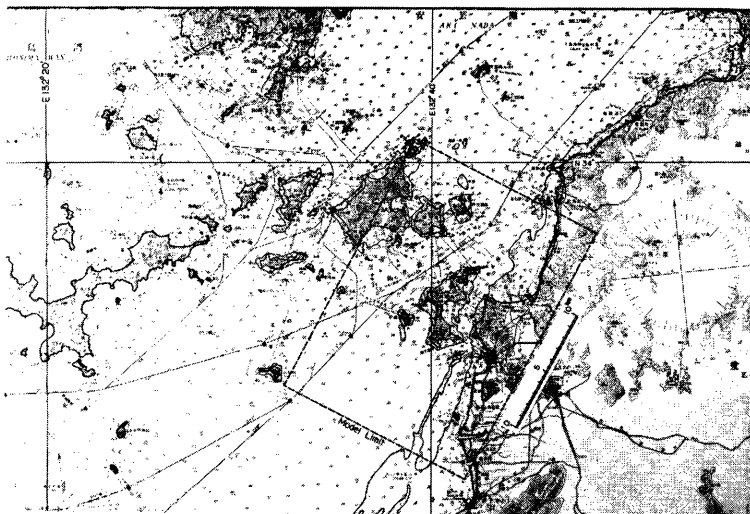


Fig. 1. Bathymetric chart near Matsuyama Harbor.

Table 1. Tidal constant in the prototype. (Mitsuhamma)

constituent	amplitude	phase lag
	H (cm)	K (°)
M_2	99.3	267.9
S_2	40.8	297.5
K_1	31.0	209.5
O_1	22.7	187.0

な状態を把握するため、 M_2 分潮を対象にした。

港外における流況の資料として、海上保安庁発行の潮流図¹⁾より抜萃したものを、Fig. 2, Fig. 3 に示す。図の流速の値は大潮における流速の値に、 $H_m/(H_m+H_t)=0.71$ をかけて平均潮における値に換算したものである。それぞれ高浜瀬戸における上げ潮、下げ潮の最盛時にほぼ相当している。港内の水面積と潮差及び港口の断面積から、港内の水位変動に伴なう港口の断面平均流速を求めてみると、大潮の場合でも最大 2~3 cm/sec (模型では 2~3 mm/sec) にしかない。このことから港内の流れは、港前面の潮流に支配されると考えられる。

港内に流入する河川は、港の中央よりやや北寄りに流入する宮前川であり、この川の流量は約 17 万 m^3/day である。

3. 相似性

模型における現象と原型の現象との相似性は、Froude 数と海底摩擦の効果および単位質量あたりのエネ

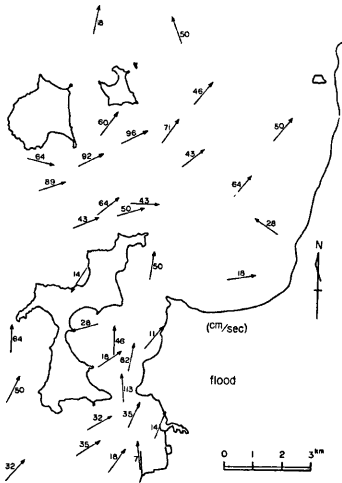


Fig. 2. Flow pattern in the flood (prototype).

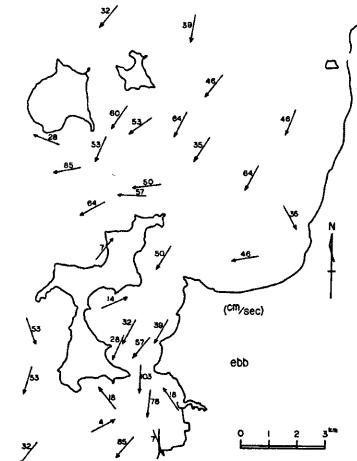


Fig. 3. Flow pattern in the ebb (prototype).

Table 2. Hydraulic factors in the prototype and the model.

Factor	Scale	Prototype	Mode 1
Distance	1/1000	10 km	10 m
Water Depth	1/100	10 m	10 cm
Tidal Range	1/100	1.99 m	1.99 cm
Tidal Period	1/100	12 h 25 m	7 m 27 s
Velocity	1/10	50 cm/s	5 cm/s
Discharge	1/10 ⁶	1 m ³ /s	1 cm ³ /s
Difusivity	1/10 ⁴	10 ⁴ cm ² /s	1 cm ² /sec

ルギー逸散率を原型と模型で一致させることによって規定される流動と拡散現象の相似則²⁾に基づくものである。対象とする海域、水粒子の移動範囲と実験施設の大きさ等を考慮して水平縮尺を1/1000とすると、この相似則に伴って模型の諸元は **Table 2** に示すようになる。

4. 実験施設

4.1 模型水槽

原型における潮流槽円の長軸方向、最大流動距離等を考慮して、模型の範囲を **Fig. 1** に破線で示したように定め、この海域の模型を長さ 22 m、幅 15 m、深さ 0.5 m のコンクリート水槽内に製作した。海底はモルタル刷毛仕上げとした。模型写真を **Photo. 1** に、模型一般図を **Fig. 4** に示す。

4.2 潮汐・潮流発生装置

模型に潮汐を考えるために、幅 20 m にわたって一様な水位変動を与え得る気圧式起潮機を用いた。また

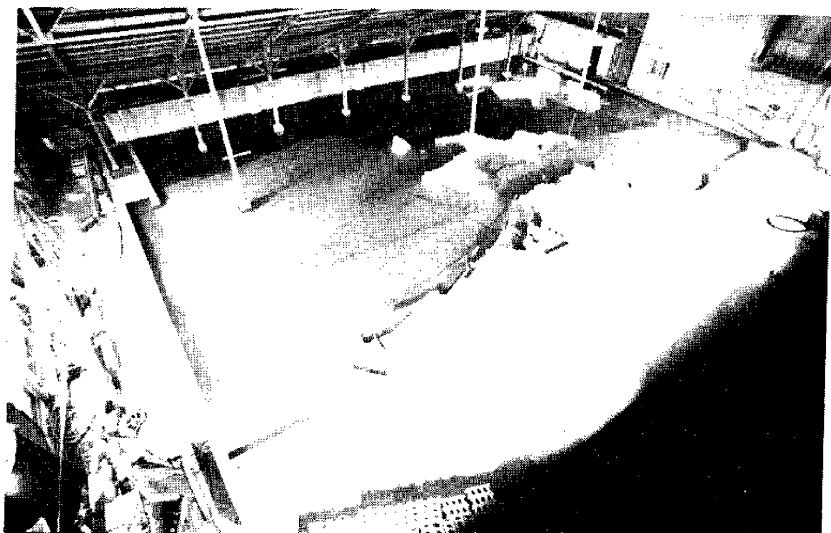


Photo. 1. Model of Matsuyama Harbor.

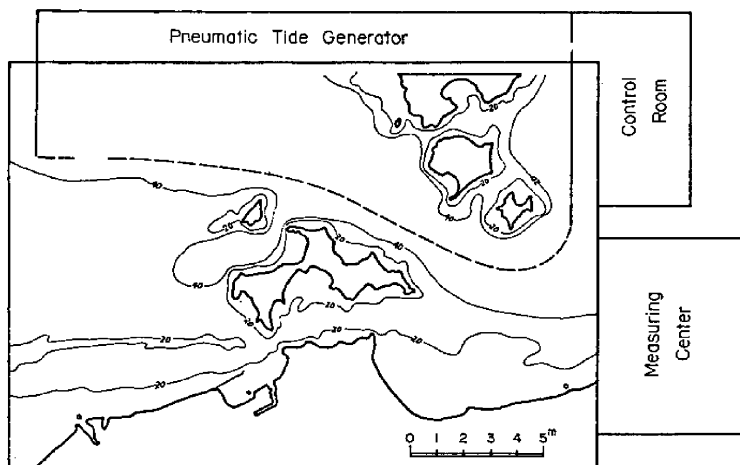


Fig. 4. Model of Matsuyama Harbor.

潮流は、Fig. 4 に示した模型水槽の両端の起潮機側の部分に流出入口を持ったポンプにより、水槽内の水を循環させることにより与えられる。この潮汐と潮流は、任意の位相差を持って与えることができ、また振幅も独立に設定することができる。これらの装置により与え得る水位変動は、全振幅が 0.1~4 cm 潮流の

最大流量は 80 l/sec 周期はいずれも約 3 分～16 分の範囲である。

4.3 計測装置

水位は触針式水位計（電子工業社製）によって測定した。流速測定は、超音波流速計（電子工業社製）による測定と写真による浮標追跡によって行なった。また染料の濃度測定は、螢光光度計（ターナー社製 111 型）によって行なった。

5. 実験経過

模型の調整にあたっては、まず潮汐定数の知られている三津浜について平均潮差 ($2 \cdot H_m$) が再現されるように起潮機を調整した。また潮流については潮流図¹⁾に基づいて高浜瀬戸最狭部における流速を再現するよう Fig. 4 に破線で示した部分に導流壁を設けた。潮汐と潮流の位相の関係については、この潮流図に基づき、三津浜の潮汐が高浜瀬戸の潮流より約 1 時間 40 分 (48°) 遅れるように設定した。以上のように調整した後、港外において浮標追跡により流況を調べ、再現性を検討した。

港内に流入する河川水の、港内での流動・拡散及び港外への流出過程を把握する実験は、最初に河川水として染料水（メチレンブルー溶液）を投入し、写真撮影によってその概要を調べた。次にこの結果に基づき、港外への流出量の時間的変化を定量的に評価するため、港口断面上に Fig. 5 に×印で示した 11 の測点を設け、染料としてはウランを投入する実験を行ない、これらの測点における染料の濃度と流速を、潮汐の一周期間に 12 回にわたる採水及び超音波流速計による連続測定によって求めた。次にこれらの結果を生みだした港内における流動構造を把握するため、港内及び港外に Fig. 5 に●印で示した 37 の測点を設け、流速計による連続測定によって流況を求めた。なお原型では Fig. 8 の a に破線で示した部分に短い防波堤があるが、取扱いの簡単のために、実験はこの部分を取り除いて行なった。

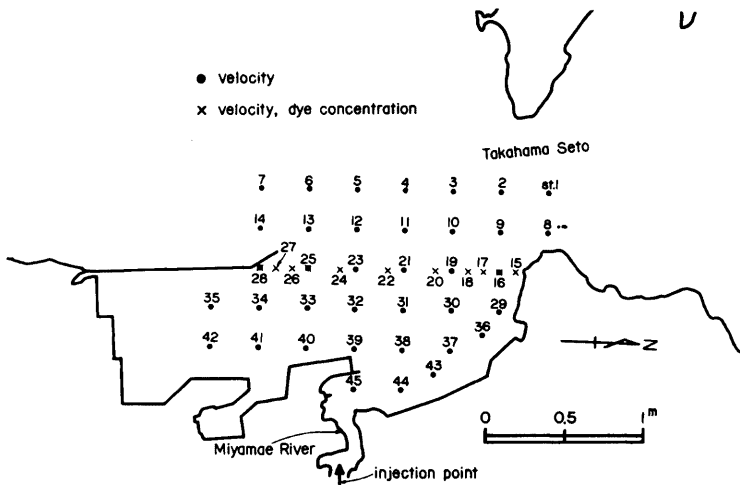


Fig. 5. Measuring stations.

6. 実験結果

既に述べたように本実験では、潮流に比べ潮汐の再現性はさほど重要ではないので結果は省略し、まず浮標追跡によって得られた港外の流況のうち、原型の資料 (Fig. 2, Fig. 3) に対応するものを Fig. 6, Fig. 7 に示す。これらによると流況のパターン及び流速共によく再現されていることがわかる。港内における流況の資料としては、港内及び港外の3測点で観測を行なったものがあるが³⁾詳細な流況を論ずるには不充分である。この資料によれば、港外の北流時に港内北半分に時計回りの環流が形成され、南流時に反時計回りの環流が形成されることがわかるが、この模様は後に示すように模型でも再現されている。

染料としてメチレンブルーを投入した実験によって得られた、染料の流動状況のスケッチを Fig. 8 に示

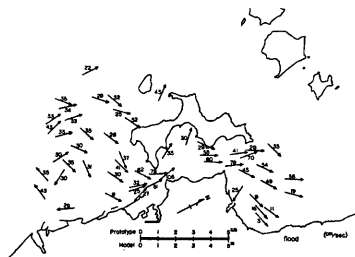


Fig. 6. Flow pattern in the flood(model).

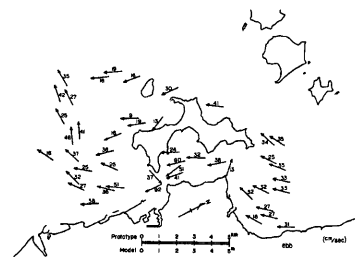


Fig. 7. Flow pattern in the ebb(model).

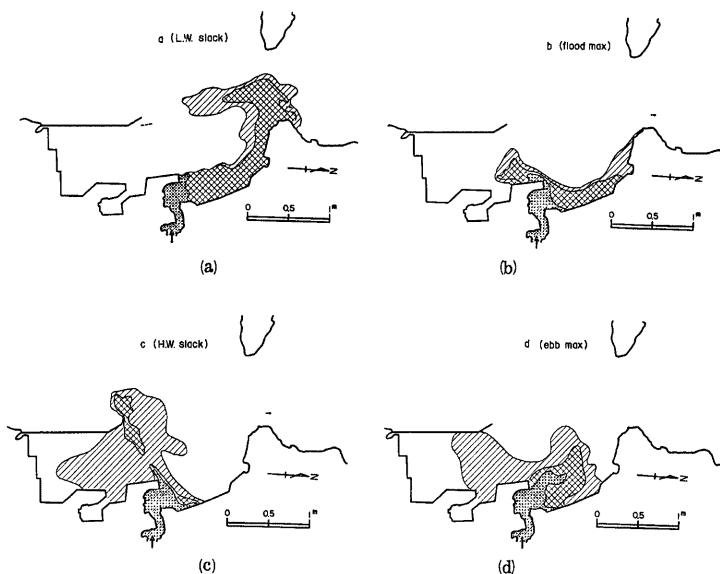


Fig. 8. Sketches of the pattern of dyed water.

す。これらは、染料投入開始後10周期程度経過したものであり、染料の流動パターン・濃度は、ほぼ安定している。これらの図に示した位相は高浜瀬戸最狭部 (Fig. 5 の st. 1 付近) の潮流の位相であり、以下についてもすべてこれに従う。Fig. 8 の a は下げ潮 (南流) 後の転流時であり、染料は港内の反時計回りの環流によって港の北岸沿いに港外へ流出している。b は上げ潮 (北流) 最盛時のものであり、河口域の高濃度の部分は南側へ動き始めており、時計回りの環流が形成された初期のものである。c は上げ潮後の転流時であり、港の中央を横切って港口南端から染料が流出している。d は下げ潮最盛時のものであり反時計回りの環流によって、河口域から北側に移動している。これらによれば、潮流による流れが港内の北半分では港のスケールに比べて大きく、半周期の間に河口付近から港外に達するのに充分であり、現象を支配しているのは主として潮流による移流効果であると思われる。また染料が港外へ流出するのは主として転流時の前後であることも予想される。

染料の港外への流出量の、一周期を通じての時間的変化を量的に評価するために、ウランを投入して行なった実験の結果から、港口断面上の測点における染料濃度の変化の模様を抜萃して、Fig. 9 に示す。濃度の値は投入原液に対する千分率である。またこれらの測点で、超音波流速計によって得られた流速分布とその変化の模様を 2m 層 (模型で 2 cm) のものを Fig. 10 に 10m 層のものを Fig. 11 に示す。図の右側が断面の北側に相当し、図の上方が港外側にあ

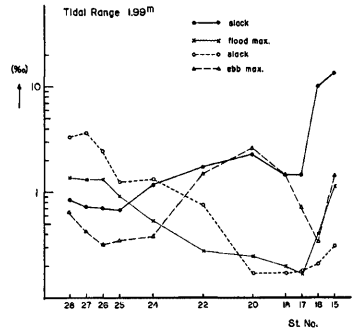


Fig. 9. Distribution and time change of the dye concentration.

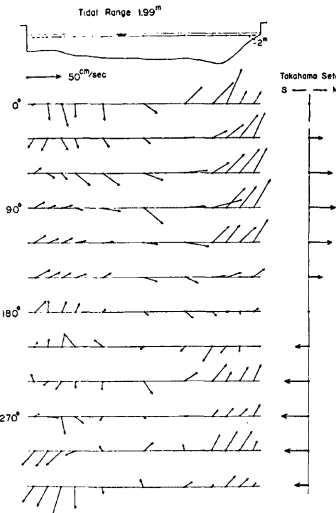


Fig. 10. Time change of the flow pattern on the section of the mouth of the harbor (2m layer).

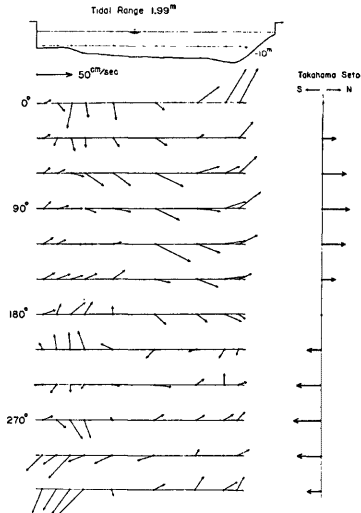


Fig. 11. Time change of the flow pattern on the section of the mouth of the harbor (10m layer).

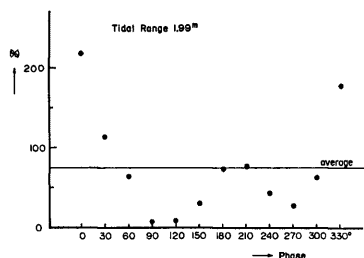


Fig. 12. Time change of the flux of river water through the mouth of the harbor.

る。また図の右端の矢印は高浜瀬戸の潮流の位相を表わしている。これらの図によれば、2 m 層と 10 m 層の間には大きな差はない。断面の北側では下げ潮初期（位相 210°）を除いて港外向きに流れており、港外向きの成分が最大になるのは、下げ潮後の転流時（位相 0°）である。また港口南側では、0°~60°及び240°~330°で港内向き 90°~21°で港外向きに流れており、これらによって、断面上での流速変化は高浜瀬戸より 90° 前後遅れることがわかる。これらの流速の断面に垂直な成分と濃度の値、及び各測点が代表する断面面積の積によって求めた断面を通じての染料の流出量（移流 flux）の時間的変化を、投入点での染料投入量を100として、Fig.12

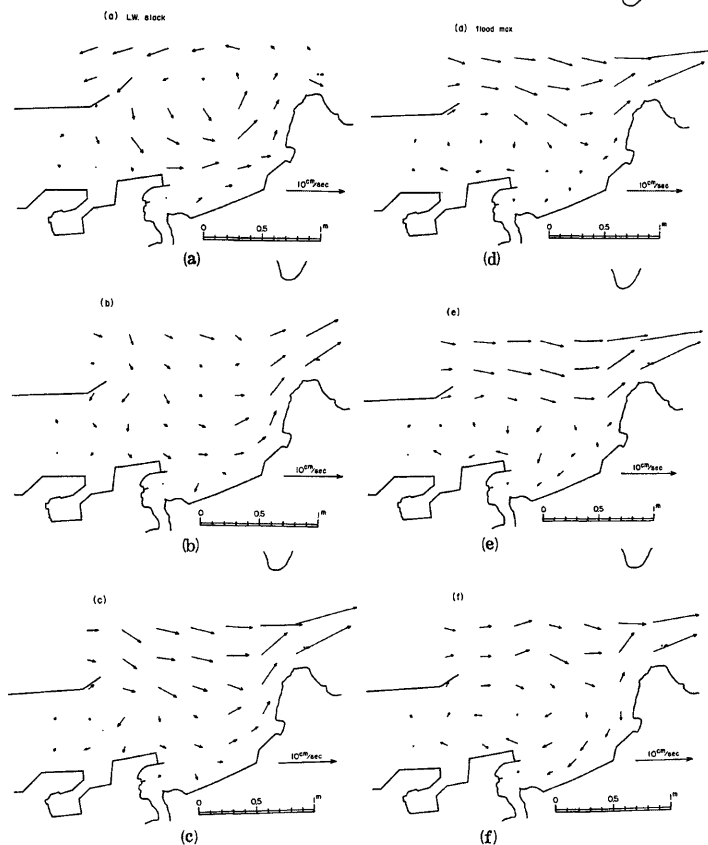


Fig. 13. Time change of the flow pattern in and near the harbor.

に示す。横軸は高浜瀬戸の潮流の位相である。また図中の実線は流出量の平均値である。この図によれば流出量は位相 0° と $180^{\circ}\sim 210^{\circ}$ に2つのピークを持ち、特に 0° においては一周期全体の流出量の25%程度、更にその前後の 30° 及び 330° を含めた1/4周期間では60%程度にも達している。流出量の平均値が投入量より小さい原因としては、ここでは移流 flux のみを考えたことや、港内の濃度の上昇に使われたこと、または測定誤差等が考えられるが、Fig. 12の結果の示す傾向に大きく影響することはないと思われる。

このように転流時に染料流出が集中した原因を検討するために、港内及び港口付近で測定した流速の分布とその時間的変化を Fig. 13, Fig. 14 に示す。これらは先の実験と同様に一周期を12の間隔に区切ったもので、Fig. 13の左上が位相 0° で、下へ順に（図中に a. b. c で示した順） 30° ずつ位相の進んだものである。また恒流の分布を Fig. 15 に示す。Fig. 13の a は下げ潮後の転流時であり、下げ潮に伴って形成された反時計回りの環流の中心は、港外の st. 11 付近にある。これより位相の 30° 進んだ b では、港外の上げ潮

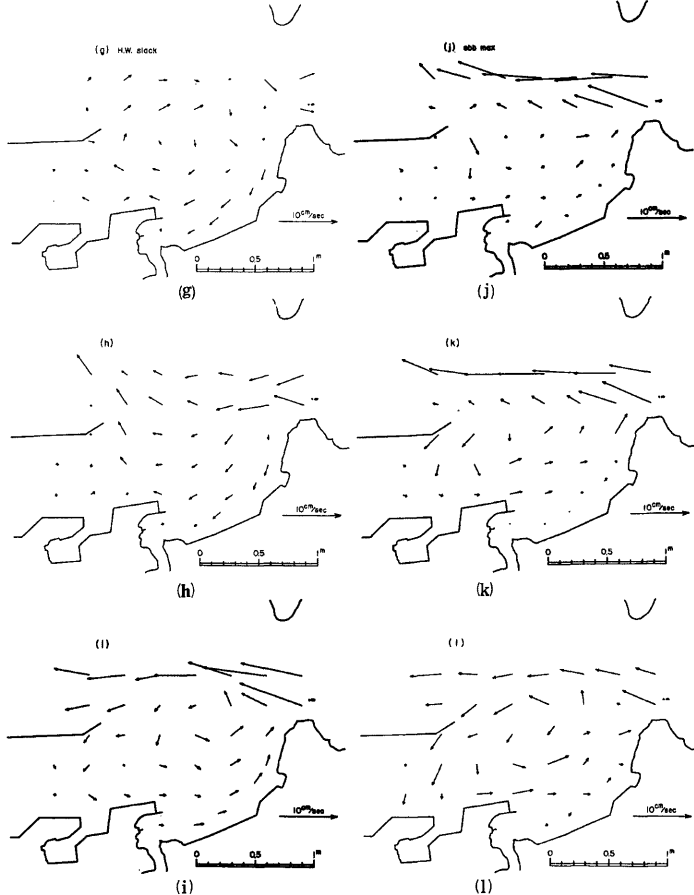


Fig. 14. Time change of the flow pattern in and near the harbor.

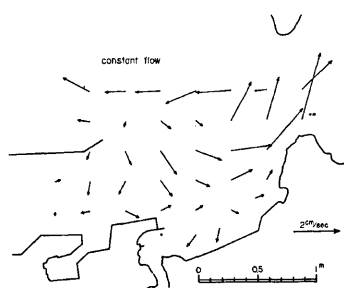


Fig. 15. Constant flow in and near the harbor.

状にも関連が深いと思われる。その後の j. k. l. では、環流の中心は港口断面上の st. 22 付近に移動し、規模の大きな環流となる。Fig. 15 の恒流のパターンは港口断面南側から港内に流入し、北側から港外へ流出するという形をとるが、下げ潮後の転流時に港口の北側から大量の染料流出が起った事は、この恒流も関係していると思われる。

7. 考 察

Fig. 13 Fig. 14 の流況の時間的变化によると、染料の港外への流出が転流時に多いことは、現象的には次のように考えられる。港外の北流及び南流に伴って港内に時計回り及び反時計回りの環流が交互に形成され、転流時にその中心が港口ないしは港外に移動し、規模の大きな環流になることにより、港口断面の北側南側での出入りが大きくなる。この環流によって運ばれた染料が、港外へ出る訳であるが、ここで重要なことは、転流時にこの環流の港外側の部分が転流し、それに対し港内側の転流が遅れることによって環流が壊れることである。このことによって一度港外へ出た染料は転流後の南流または北流によって運び去られ、港内へ帰らない。港口断面を流出入する流速が大きくなっても、閉じた環流が持続する限りは、港口の片側から流出した染料は、港外の潮流との境界での拡散によって減少する部分を除いて再び港内に帰ってくるから、実質的には大きな染料流出は起きないであろう、すなわち。転流時の港外への流出が実質的な意味を持つのは、このように環流が崩壊することによるのである。染料の流出が転流時の前後に集中したことの必然性はこの点にあると言えるであろう。

さて、本実験の結果が灘規模の物質流動拡散過程の問題に対する意味について考えてみよう。本実験の結果によれば、松山港から潮汐の一周期間に流出する河川水のうち、60%程度は下げ潮後の転流時の前後の1/4周期間に港外へ流出するが、これらはその後の上げ潮によって高浜瀬戸を通過して安芸灘側に運ばれることになる。これに対し上げ潮後の転流時の前後に流出する部分は、全体の20%程度にしかならない。Fig. 15 に見られるように港外には南向きの恒流が存在しているにもかかわらず。このように大部分が北側へ拡がっていくのは興味深いことである。このような事情は、この河川が港という中間領域を経ないで直接伊予灘へ流出している場合とは全く異なるのである。またもし松山港の開口部が充分に狭く閉鎖的な内湾といった状態になっていたらとすると、港内水の流出は主として下げ潮時におこるであろうから、港前面の南向きの恒流の影響も加わって、安芸灘側へは殆んど運ばれないことになる。このように考えると、仮に松山港内に流入する河川に起源を持つ物質の灘内部における分布を水理実験なり数値実験なりで予測しようとする場合に、現実に近い境界条件を与えるためにはかなりの大型模型ないしは極めて細かいメッシュによる数値模型等が必要になる。これら为了避免するためには、予めその供給源の振舞いを十分に検討した上で投入法等を工夫しなければならないであろう。

本実験では、松山港に流入する河川水が転流時に集中して港外に流出することを現象的に明らかにした訳であるが、このような現象は港ないしは内湾の形状やスケール、前面の流速の大きさや分布等にも密接な関係がある。このような種々の要因を分析するためには、特定の地形によらない、簡単な形状の模型（いわゆる基礎模型）等による実験が必要であろう。また本実験では河川水のみに着目した訳であるが、港内と港外の海水交換といった観点からもこのような現象を抱えていく必要があると思われる。

8. あとがき

以上著者らは水平縮尺 1/1000、鉛直縮尺 1/100 の模型を用いて、松山港に流入する河川水の港外への流出過程を明らかにする実験を行ない。現在までに次の事が明らかになった。

- (1) 高浜瀬戸の流速を再現することにより松山港付近の潮流はほぼ再現された。
- (2) 港内に流入する河川水の港外への河川水の流出は潮流による移流によって支配される。
- (3) 港外への河川水の流出は港前面の潮流の転流時に集中し、下げ潮後の転流時前後の1/4周期には一周期全体の流出量の60%程度、上げ潮後の転流時前後の1/4周期には、全体の20%程度が流出する。
- (4) 港外への河川水の流出が転流時に集中するのは、港内に形成される環流の、転流時における移動と拡大及びその後の崩壊による。

本実験では半日周潮のみを対象として水平的な問題を取り扱った訳であるが、現実的には密度分布や風、潮汐の変化等の影響も考慮する必要があるだろう。今後は、このような現象に関わる空間的、時間的規模や地形の影響等の要因を分析していくために基礎模型等による実験を進めていきたいと考えている。

この研究を進めるにあたって貴重な助言・討論を頂いた京大大学院工学部教授国司秀明氏、愛媛大学工学部助手柳哲雄氏に深甚なる謝意を表する。

なおこの研究は一部運輸省の委託によって行なったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 海上保安庁：釣島水道・クダコ水道付近潮流図，海図第6210号，1964.
- 2) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水利模型実験について（Ⅳ），京都大学防災研究所年報，第13号 B，1970，pp.457-470.
- 3) 運輸省第三港湾建設局：松山港潮流調査報告書，1976.