

松山港の海水交換

武岡 英隆*・森 田 晋**

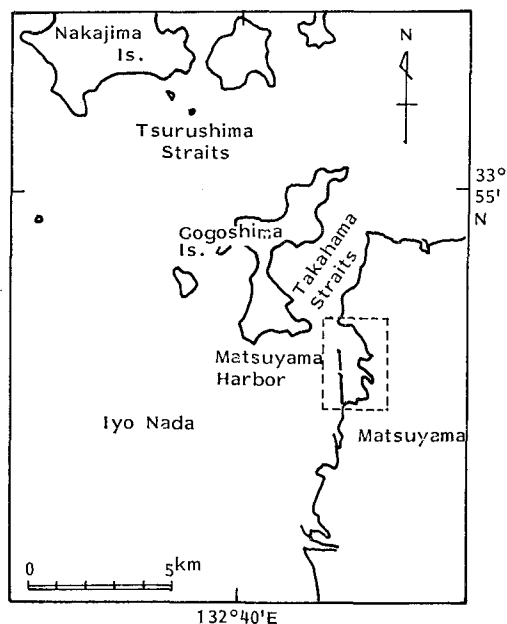
1. ま え が き

松山港は、瀬戸内海の伊予灘の北東端に位置する、幅約 2.5km、奥行き約 1km の港である（図—1, 2）。港の南北半は防波堤によって外海と区切られている。港の北側には安芸灘と伊予灘を結ぶ海峡水道群の一つである高浜瀬戸があり、このため港の前面を流れる潮流は比較的速い。港内の北東の梅津寺海岸は、海水浴場として広く利用されている。このため、港口の中央部の防波堤の建設に際しては、港内の水質環境保全のため、水理模型実験の結果に基づき、その北半分は開口比 15% の透過堤とされた。この透過堤の役割は、港の海水交換機構と関連が深い。武岡・樋口²⁾は、この松山港の水理模型実験によって得られた海水交換に関する知見³⁾をもとに、前面に強い潮流を有するような小港湾での海水交換機構を、単純化した水理模型実験によって明らかにした。し

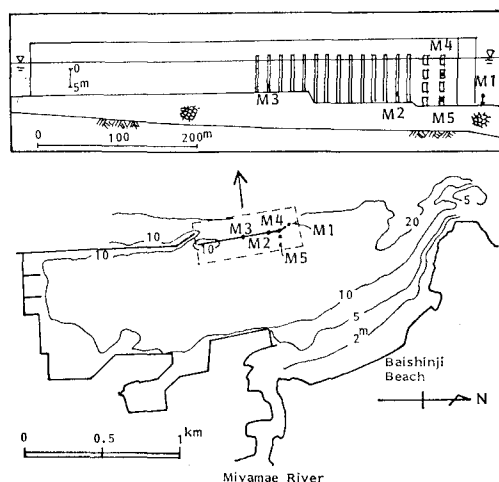
かし、このような海水交換機構の原型での検証は十分ではない。本研究の目的の第 1 は、松山港での現地観測によって、原型でも同様の機構による交換が起こっていることを検証することである。また第 2 の目的は、透過堤開口部での流量を把握することによって、透過堤の機能について検討することである。

2. 実験による海水交換機構

まず、武岡・樋口²⁾に従い、強い潮流の場に面した小港湾での海水交換機構を要約しておこう。図—3 は、幅 0.5m の潮流水路の一部に設けられた一辺 0.5m の正方形湾での流況を、潮汐の 1/12 周期ごとに半周期間示したものである。(a) は水路の流れの左向きから右向きへの転流時、(d) が右向きの流れの最強時である。(f) 以後は (a)～(f) の左右を逆にした流況へと移行する。この図から湾内外の海水交換の機構を推定することができる。湾内には、水路の潮流の向きに対応した渦流が形成される。(a) の転流時においては、その前の水路の左向きの流れによる反時計回りの渦流が湾内に残っており、湾口を通しての強い流入と流出が起こっている。転流直後の (b) では、湾口上流側に剝離による時計回りの渦が



図—1 松山港と周辺の地形



図—2 松山港の海底地形と防波堤正面図及び潮流観測点 (M 1～M 5)

* 正会員 理博 愛媛大学講師 工学部海洋工学科

** 正会員 運輸省港湾技術研究所設計基準部研修資料課長

形成されており、湾内には依然反時計廻りの渦の名残りが持続している。この時も湾口下流側で流出が起こり、上流側での流入は湾外水が時計廻りの渦に取り込まれる形で起こる。この時計廻りの渦が成長して湾口幅一杯に広がった(c)から(e)にかけての状態では、湾口を通しての流出入はほとんどなく、次の転流直前の(f)になってわずかに流出入が起こり始める。このように湾口を通しての流出入が起こるのは水路での転流時を含む短時間に限られ、湾内外の海水交換もこの時期に起こると考え

られる。このことは、染料を投入しての交換の実験で確かめられている²⁾。このように、湾内外の海水交換は前面の潮流の影響下に湾内に形成消滅を繰り返す渦によって支配されている。

このような渦流による湾内の流動構造は、湾内外の海水交換のみでなく、湾内へ流入してくる河川水の湾外への流出形態にも影響を及ぼす。図-4は樋口ら³⁾による実験の結果を示したもので、松山港に流入する河川水の1/4周期ごとの分布である。(a)は港外が下げ潮(南流)から上げ潮に転じる転流時で、(c)はその逆の転流時、(b)と(d)はそれぞれ上げ潮と下げ潮の最強時である。これらの図からわかるように、河川水の港外への流出も主として港外の転流時におこる。なお、武岡⁴⁾によれば、このような、河川水の流出の問題も一種の海水交換の問題として捉えることができる。

3. 観 測

松山港の南半分は防波堤で外海と区切られているため停滞性が強く、海水交換に直接関与するのは港の北半分であると考えられる。この部分を考えた場合、港口幅と奥行きは同程度であり、前記の実験の設定に近い。従って、この部分での流動構造を明らかにして実験と比較することにより、松山港で実験のような機構による海水交換が起こっているか否かを検証できよう。しかしながら、多くの流速計を配置して流動場を空間的に捉えることは、船舶の航行の激しい港内では困難である。そこで、港口の南端での流速計による観測と、航空写真観測を並行して行った。港内海面の航空写真では、河川水の

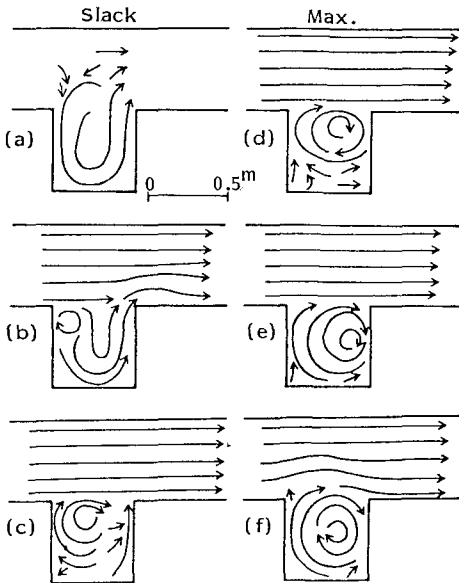


図-3 湾及び付近の 1/12 周期ごとの流況²⁾

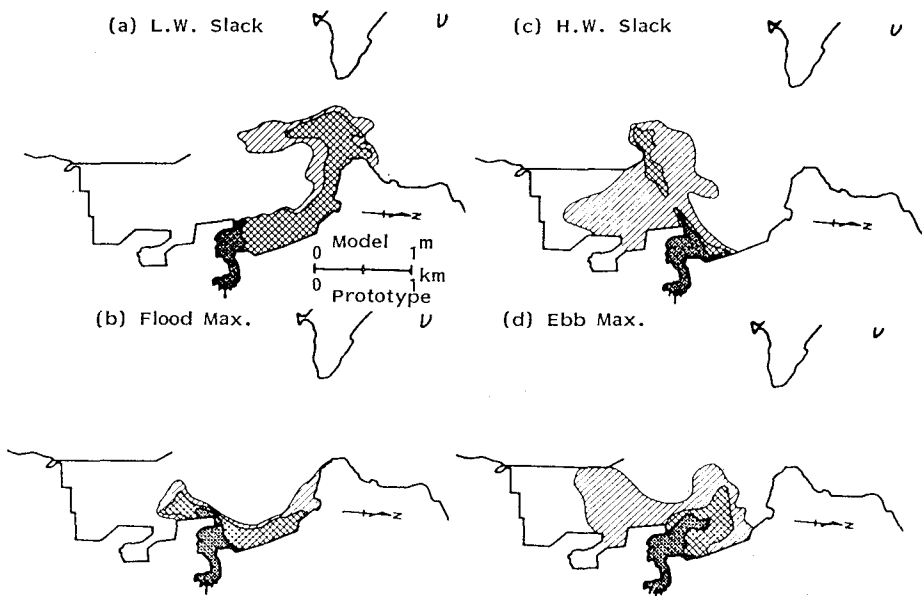


図-4 実験による河川水の流出状況³⁾

流入や底泥の巻き上げ等による海水の色の違いから、ある程度空間的な流動場を把握することができる。さらに、透過堤の機能を調べるために、透過堤開口部での潮流観測も行った。これらの観測は、1980年から1982年にかけて行った。

流速計による観測の測点は、図-2のM1~M5である。M1は防波堤先端より約20mの海底上3m、M2、M3は開口部内の海底上1mの点である。また、M4は開口部の海面下約1m、M5は開口部の港内側の海底上1mの点である。これらの点のうち、M1~M3では1980年11月に15昼夜連続観測を、M4では1981年8月に30昼夜の連続観測を行った。また、1980年11月から1982年1月の1年余りの間、M1またはM5で連続観測を行った。用いた流速計はすべてアンデラRCM4型流速計であるが、M2、M3の観測では、UCM-2型超音波流速計を併用した。航空写真観測は、これらの観測に並行して適宜行った。

4. 観測結果と考察

(1) 流動について

潮流観測結果の代表例として、M1~M3での24時間50分の流速の例を図-5に示す。正の値は港内向きの流れを表わす。図の下部に示したのは、防波堤先端の西方約500mの点でのM₂潮流の調和常数⁵⁾による港前面での潮流の位相で、F、Eがそれぞれ上げ潮と下げ潮の最強時、HSが上げ潮から下げ潮への転流時、LSがその逆の転流時を表わす。図でまず注目されるのは、HSの直後から各測点に表われる30分~1時間周期の変動であるが、このような短周期変動については別に詳しく報告しており⁶⁾、ここでは触れない。これらの変動を除いた潮流成分の位相に注目すると、港外のLSの1時間程後に各測点での流入が最強となり、HSの1時間程後に流出が最強となっている。このことを調和常数から見れば、M1~M3の遅角が110~170°であるのに対して港前面では約230°であり、60~70°の遅角の差と

なって表われる。また、M1におけるM₂潮流の振幅は約18cm/sであるが、港内の水位変動に必要な港口断面平均の潮流の流速はM₂潮に関しては1.8cm/s程度であり極めて小さい。別な言い方をすれば、港口全体がM1と同位相、同振幅で流れるとすれば、港内の水位変動の振幅は実際のM₂分潮の振幅の10倍になる。従って、上記の流速による港口南端での流入に対しては、港口北側での流出が必要である。このような、港外の転流時に近い時期の港口での強い流出入および港外と港口での流れの向きの関係は、図-3の実験結果に近いものである。

次に、航空写真観測結果の一部を写真-1(a)~(d)に示す。また、これらの写真から推定される流動を図-6(a)~(d)に示す。これらの写真は撮影日は異なるが、いずれも大潮に近い時のものである。(a)は上げ潮最強時のもので、港内には時計廻りの渦が生じているのがわかる。白く見える部分は黄色く濁った部分で、底泥の巻き上げによるものと思われる。(b)は下げ潮から上げ潮への転流時の直後のものである。この撮影の前日に強い降雨があったため、河川より濁水が大量に流入しており、写真で白く見える部分はこの濁水である。この河川水は港口北端より流出しており、この状況は図-4の(a)によく対応している。(c)は下げ潮初期のものであり、港口北端の港内側に反時計廻りの渦が形成されている。(d)は(c)と同じ時に撮影した透過堤の部分で、各開口部より噴流状を呈した強い流出があることがわかる。これら(c)と(d)に見られる港口上流側での剝離渦の形成と下流端での流出は、図-3の(b)の流況によく対応している。

以上のような流速観測ならびに航空写真観測から得られた港内の流動状況は、いずれも部分的なものではあるが、図-3の流動の変動様式に基本的にはよく一致しており、松山港においても、渦の形成と消滅に支配され転流時に交換が起こるような様式での海水交換が起こっているものと考えられる。

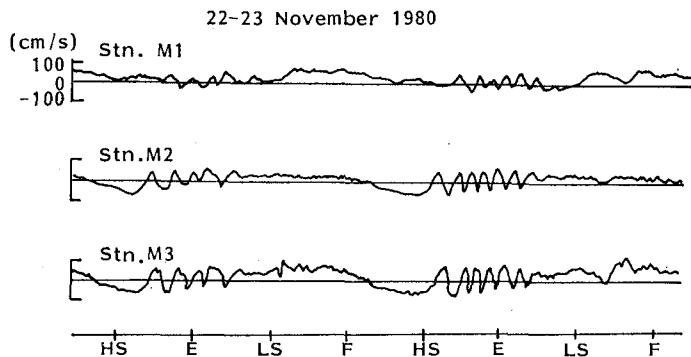
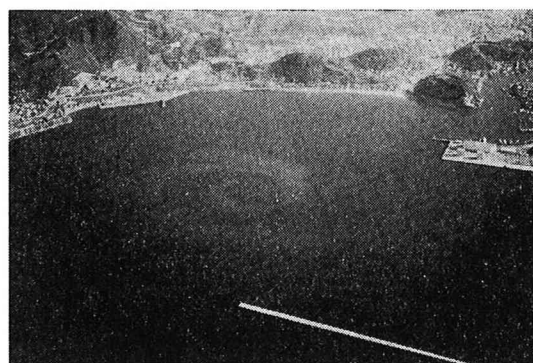


図-5 M1, M2, M3における流速の例(24時間50分間)



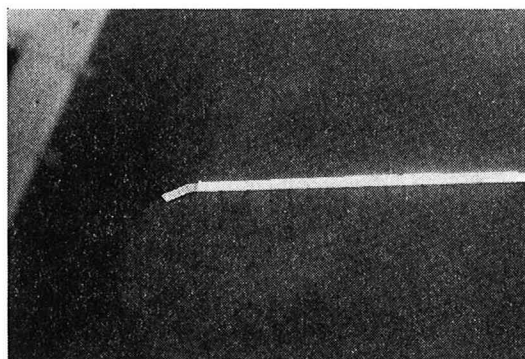
(a)



(c)



(b)



(d)

写真-1 航空写真の例 (a) 1980年12月11日, 上げ潮最強時(南西より撮影) (b) 1980年12月3日, 低潮転流時(北西より) (c) 1981年8月10日, 下げ潮初期(北西より) (d) 1981年8月10日, 下げ潮初期(透過堤部)

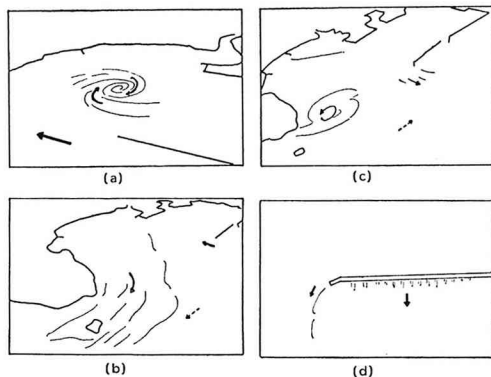


図-6 航空写真に基づいた流況

(2) 透過堤の機能について

港口防波堤の一部を透過式にしたことの海水交換への効果を厳密な意味で定量的に評価するためには、透過式の場合と非透過式の場合との海水交換の違いを評価すべきであろう。このような評価は、透過堤の建設に際し水理模型実験によって行われている¹⁾が、原型でこのような評価をすることは不可能である。そこで、ここでは主として開口部を通して流量の面からその機能について検

討することとする。

卓越分潮流である M_2 潮流の振幅を各測点で比較してみると、港口南端の M_1 では 18 cm/s であるのに対し、開口部の $M_2 \sim M_4$ での平均値は 36 cm/s と M_1 の2倍になっており、開口部では壁面の抵抗にもかかわらず強い流れがあることがわかる。それでは、ここでの流量は港口全体の流量の中でどの程度を占めているであろうか。既に述べたように、港口断面全体では M_1 と同じ流速で流れている訳ではなく、港口の南と北では互いに逆に流れていると考えられる。そこで、港口断面上の流速分布を、例えば M_1 で流入している場合、図-7のようになっていると仮定する。この場合、流入する流れを港口断面全体で平均した流速は M_1 の流速の約 $1/4$ となり、開口部の流速から見れば約 $1/8$ となる。従って、港口全体の断面積に対する開口部の断面積の割合は2%に過ぎないのに対し、全体の流入(出)量に対する開口部の流入(出)量の割合は16%にも達することになる。このように流量の寄与率が大きくなるのは、開口部の流速が大きいことと、港口断面上の流速分布の結果である。

さらに、透過堤を通しての海水交換の効率について検

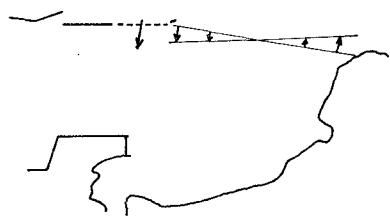


図-7 港口断面上の流速分布の模式図

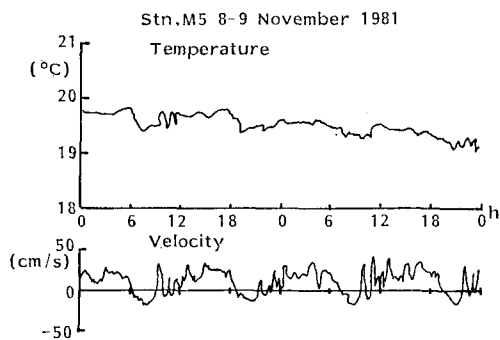


図-8 水温と流速の記録の例 (2 日分)

討してみよう。図-8 は、M5での港内向きの流速と水温の記録の例である。この時期は冷却期で、港内水温が港外より低い。この図で、水温と流速の変動の位相がよく一致していることが注目される。この位相の一致は、ここを通しての交換の効率が極めて良いことを示している。例えば、2日の6時までの流入時には水温は19.7～19.8°Cでほぼ一定で、6時の転流とともに急激に低下し、12時までの流出時には、流入時の水温はほとんど出現しない。即ち、流入した港外水がほとんど港内水と交換したことを意味する。

以上のように、透過堤での流速が大きいことやそこでの交換の効率が良いこと等を考慮すれば、定性的にはあるが、透過堤は海水交換に寄与していると言うことが

できよう。一方、港内外の海水交換を考えた透過堤に関する研究として、中野ら⁷⁾は名瀬港での実験について報告している。この例では、通常の防波堤を建設した方が、透過堤の場合あるいは現況の場合より海水交換が良くなること、透過堤開口部では抵抗により主要な港口部より流速が小さくなること等が指摘されている。このような松山港と名瀬港の違いは、両者の流動及び海水交換機構が根本的に異なるからと考えられ、水質保全のために透過堤等を計画する場合には、対象港湾での海水交換機構の十分な解明が必要であらう。

5. あとがき

以上、松山港での現地観測の結果、松山港では武岡・樋口²⁾の示した機構による海水交換が起きていること、透過堤は海水交換に寄与していることが明らかとなった。なお、透過堤開口部での流速が大きいこと理由は今のところ不明であり、今後の解明が必要であらう。

参 考 文 献

- 1) 防災研究協会：松山港汚染拡散実験報告書，253 p.，1976.
- 2) 武岡英隆・樋口明生：地形性渦流による小港湾の海水交換，沿岸海洋研究ノート，第19巻，第2号，pp. 175～182，1982.
- 3) 樋口明生・武岡英隆・北川吉男：松山港における潮流の水理模型実験，京都大学防災研究所年報，第20号 B-2，pp. 541～551，1977.
- 4) 武岡英隆：沿岸海域の海水交換，沿岸海洋研究ノート，第21巻，第2号，pp. 169～182，1984.
- 5) 運輸省第三港湾建設局松山港工事事務所：松山港潮流調査報告書，104p.，1976.
- 6) 武岡英隆・樋口明生：松山港の海水交流 (I)，愛媛大学工学部紀要，第10巻，第2号，pp. 203～210，1983.
- 7) 中野拓治・岩上淳一・溝内俊一・入尾野幸雄：名瀬港における潮流実験——防波堤計画の比較検討——，第29回海工講演集，pp. 629～632，1982.