

海峡部における潮流の特性に関する研究

武岡 英隆・樋口 明生

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF THE TIDAL CURRENT IN A CHANNEL

By *Hidetaka TAKEOKA and Haruo HIGUCHI*

Synopsis

Flow pattern in a channel and its characteristics are studied with use of the hydraulic model of Takahama Straits, of which horizontal and vertical scales are 1/1000 and 1/100 respectively.

Circulations are formed in the irregularities in the shoreline of the channel, which trap water in themselves. Being these circulations broken when the tidal current reverses, trapped water is exchanged for the water in the main stream in this short period. This process leads to the effective longitudinal dispersion in the channel. Some of these circulations, formed by the tidal current, are not formed by the stationary current through the channel.

1. ま え が き

海峡や水道を通じての海水交流及びそれに伴う海水交換の問題は、沿岸海洋における物質分散を扱う上で重要な問題であり、近年この方面での研究が数多くなされつつある。しかし、この種の研究は一般に交換率を求めることを主眼におく場合が多く、流動場に伴う具体的な交換のメカニズムは明らかにはされておらず、特に海峡内部においては測流の困難さ等により流動の実態は明らかではない。従ってこの研究は、水理模型実験により海峡内部での潮流の流動の実態とその特性及びそれらに含まれる問題点を把握するために行ったものである。

対象とした海峡は、瀬戸内海の伊予灘の北東部と安芸灘を結ぶ水道群のうち最も四国側の高浜瀬戸である。これは Fig. 1 に示したように、長さが 3~4km の小さな海峡で、東は四国、西は興居島（ごごー）によって挟まれており、幅は興居島側の由良湾の存在により 1~3km と変化している。海峡部の問題を扱う場合には断面形が一樣で真直なモデルで考えることが多いが、現実の海峡は来島海峡のように内部に島が存在するものや、関門海峡のように屈曲したもの、芸予諸島におけるように水道群の入り組んだもの等、一般には地形は複雑であることが多い。高浜瀬戸における由良湾の存在は、こうした複雑な地形の一つの典型と考えられ、このような地形による現象の特徴を知る上で有利であると思われる。

2. 実験の概要

実験に用いた模型は、水平縮尺 1/1000、鉛直縮尺 1/100、の Froude 模型で、著者らが松山港を対象に行った実験¹⁾ で用いたものと同じものである。模型諸元を Table 1 に、模型一般図を Fig. 2 に示す。潮汐は Fig. 2 に示した気圧式起潮機によって与えられるが、潮流はこれとは独立に、模型の両端に流出入口を持つポンプにより模型内の水を循環させることによって与えられ、このポンプで一方にのみ流れる定常流も与えることが出来る。

今回の実験では、海峡内での流況を詳細に把握し、潮流の流動構造とそれに含まれる問題点を探ることを目的としたので、実験は流速測定を主体に行った。Fig. 3 に測点の分布を示す。高浜瀬戸の内外の 6 つの

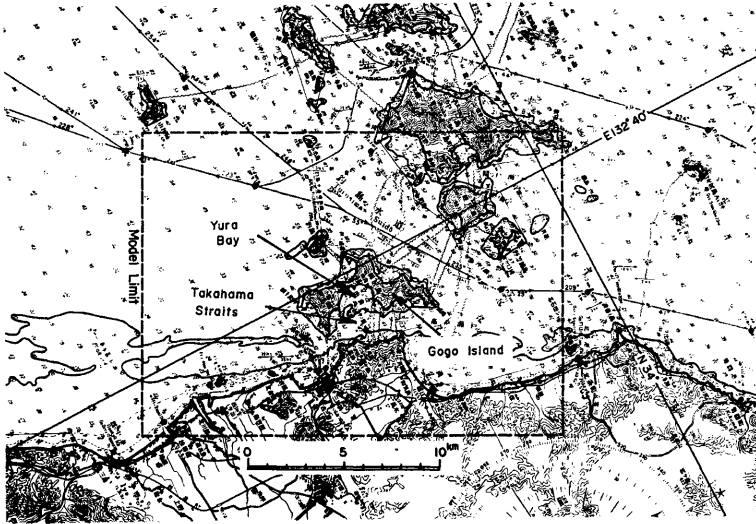


Fig. 1. Bathymetric chart of Takahama Straits and neighborhood.

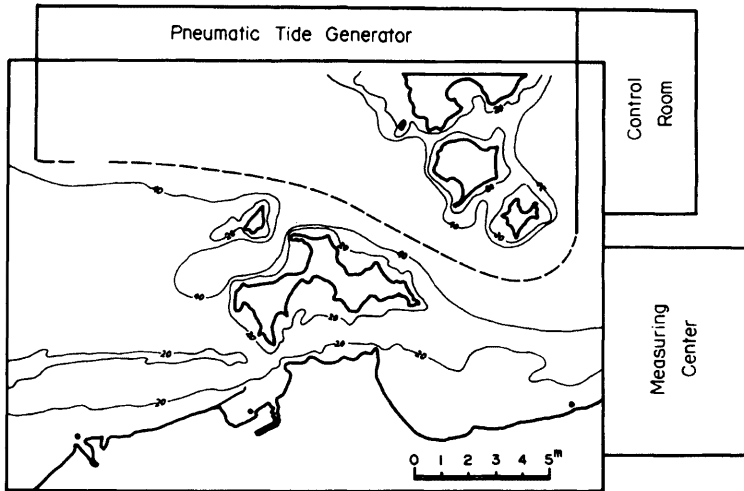


Fig. 2. Schematic diagram of experimental facilities.

測線 L 1 ~ L 6 において、○印で示したように模型で 20cm (原型で 200m) の間隔の測点を設けた。このうち最狭部の測線 L 2 では 10cm の間隔で測点を設け、Fig. 3 左上に示したように鉛直にも 10cm (原型で 10m) 間隔で測点を設けた。この鉛直断面における測点は高浜瀬戸を通過する流量を得るためのものである。

Table 1. Hydraulic factors in the prototype and the model.

Factor	Scale	Prototype	Model
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
Diffusivity	1/10 ⁴	10 ⁴ cm ² /s	1 cm ² /sec

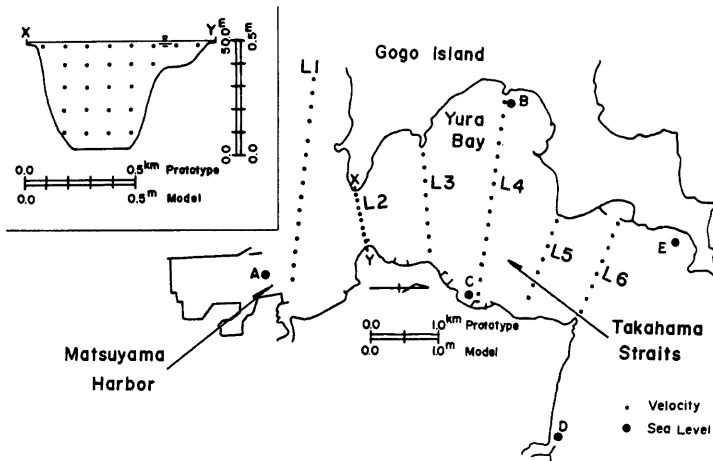


Fig. 3. Distribution of measuring stations.

実験では M₂ 分潮をくり返し与え、これらの各測点において、超音波流速計（電子工業社製）によって 1 周期間の流速の測定を行った。また流動に伴う水位差を求め、流量と対応させるため、Fig. 3 に●印で示した A～E の 5 点で触針式の水圧計による水位測定を行った。また、振動流としての潮流の特性を探るため、上げ潮、下げ潮の向きに定常流を与えた実験を、各々 3 種の流量について行い、潮流と同様の流速・水位測定を行った。なお、超音波流速計のプロープの間隔は 5.5cm である。

3. 実験結果と考察

3.1 流況について

実験の結果得られた流況を Fig. 4, Fig. 5 に示す。これらは 1/12 周期毎の流況を示したもので、位相は測線 L2 の平均流速に基づいており、Fig. 4 の a が下げ潮から上げ潮への転流時、d が上げ潮最強時、Fig. 5 の g が転流時、j が下げ潮最強時のものである。またこれらのうち、上げ潮、下げ潮の各最強時における流況を模式的に表わしたものが各々 Fig. 6, Fig. 7 である。1 周期を通じて特徴的なことは、上げ潮最強時 (d) 付近から次の転流時 (g) 付近までは由良湾内に測線 L3, L4 にまたがる反時計回りの環流が形成されており、逆に下げ潮最強時 (j) 付近から次の転流時 (a) 付近までは時計回りの環流が形成されていることである。更に各々の転流後の b, c 及び h, i においては L3, L4 の測線上で、ほぼ全体が同じ向きに

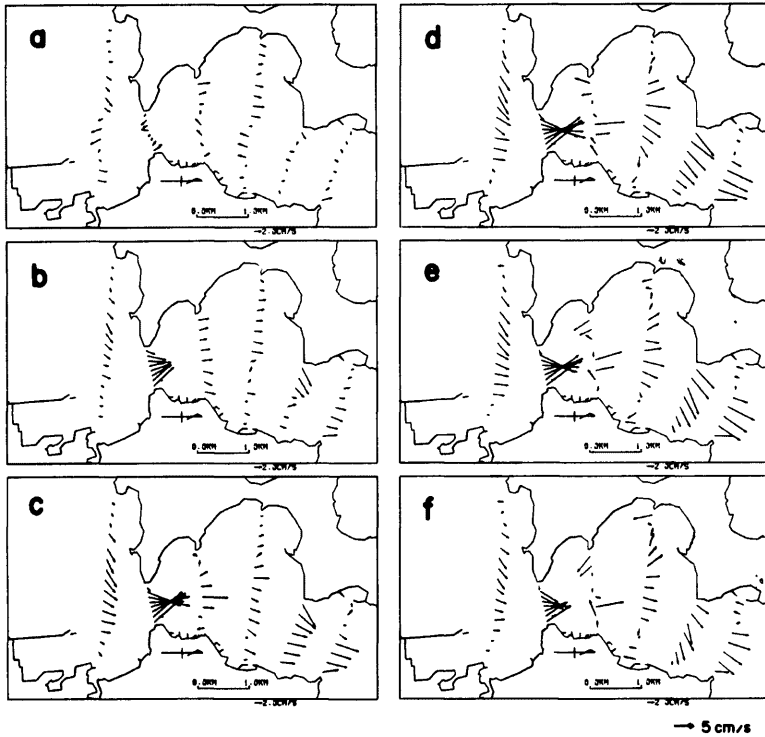


Fig. 4. Flow patterns at the low water slack (a) and at the flood (b~f) in steps of 1/12 of a tidal cycle.

流れており、この時期には環流が消滅していることがわかる。このように、全体としては由良湾の存在によりここに形成される環流が、海峡内における流況を複雑にしている。上げ潮の最強時及びそれ以後の流況について細かく見ると、Fig. 6 に模式的に示したように、由良湾の環流だけでなく測線 L 2, L 3 の四国側及び L 6 の興居島側に各々時計回り、反時計回りの環流が形成されている。これらの環流を定常流を与えた場合と比較してみよう。Fig. 8 は上げ潮の向きに定常流を与えた流況で、Fig. 9 は下げ潮の向きに与えたものであり、各々下段はその模式図である。流量は潮流の最強時よりも若干大きい、小さい流量を与えた場合の流れのパターンもほぼ同様である。Fig. 8 を見ると潮流の場合に形成されていた2つの環流が発生していないことがわかる。このことは上げ潮時におけるこれら2つの環流が単に地形の効果のみによって発生するのではなく、潮流が振動流であることの影響が加わって形成されることを意味している。これらの環流の形成過程については今後明らかにしていきたいと考えている。

次に海峡内に発生する種々の環流が物質分散に及ぼす効果について考察してみよう。流況の単純な下げ潮の場合の由良湾の環流に注目すると、下げ潮最強前 (Fig. 5, i) の頃に由良湾に環流の形成が始まり、この環流は次の転流時の a の頃まで持続している。この間、環流内には i の頃由良湾に存在していた水が、環流と海峡内の主流との接合域で部分的に交換する部分を除いて、残留する (trap される) と考えられる。

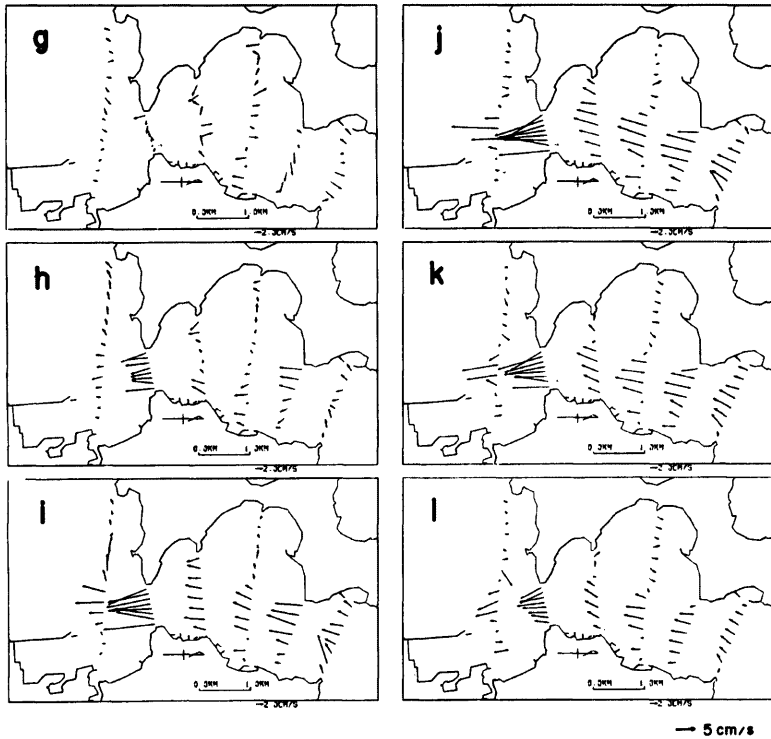


Fig. 5. Flow patterns at the high water slack (g) and at the ebb (h~l) in steps of 1/12 of a tidal cycle.

転流後の **b**, **c** においては、湾内の転流はまだ起っておらず、このため環流は消滅する。この時期の湾内の流れは湾を通過する流れとなり、その流速は 2cm/s 程度以上であるからこの約 1/6 周期（約 75 秒）の間に 1.5m 以上の行程を持ち、この時期に由良湾の大部分の水が移流によって入れ替わることになる。下げ潮の場合においても、由良湾ではこれと同様の現象が起ると考えられる。このことは、由良湾の水は転流後の **b**, **c** 及び **h**, **i** の時期に集中して主流域の水と交換（exchange）し、それ以外の時期には部分的な交換を除いて環流内に trap されるという事を意味している。こうして exchange→trap→exchange→trap という cycle が潮流の周期で起ることになる。このような交換の過程に重要なのは、**b**, **c** 及び **h**, **i** において見られるように環流が消滅し、湾を通過する移流による物質輸送が卓越することであると考えられるが、この環流の形成消滅には湾内における流速変動の位相が主流域に対して遅れることが本質的に効いている。

Pritchard²³ は、水道における岸の屈曲に伴う環流が水を trap することにより、水道の方向の分散に大きな効果を持つことを指摘している。この Pritchard の考え方は、水道内の水に負荷された物質が岸の凹部を通過する時にその一部が凹部に trap され、物質の主要部分が通過した後、凹部より徐々に物質が放出されることにより、主要部の後方に大きな分散を引き起すというものであり、具体的な trapping の構造は明らかにしていない。先に述べたことはこの trapping のメカニズムを明らかにしたものとすることができる。

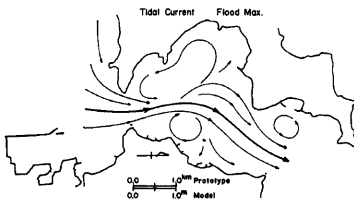


Fig. 6. Flow pattern at the flood.

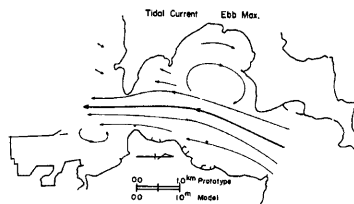


Fig. 7. Flow pattern at the ebb.

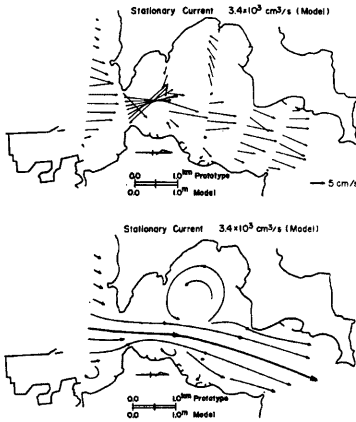


Fig. 8. Flow pattern in the case of the northward stationary current corresponding to the flood tidal one.

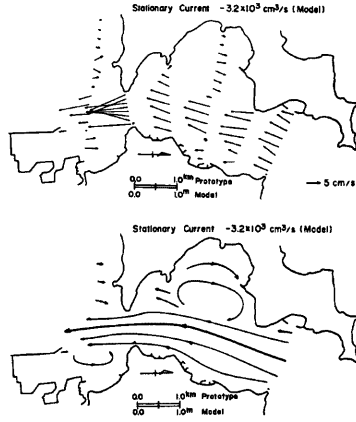


Fig. 9. Flow pattern in the case of southward stationary current corresponding to the ebb tidal one.

更にこのようなメカニズムによれば trap された水と主流域の水との交換は環流の持続する間徐々にしか起らず、環流の消える時期に集中して起ることに注意しなければならない。もう一つ興味深い点は、環流域と主流域の水の交換は、潮流の特定の位相において集中的に起るということであり、環流が形成されている時期に水道を通過する物質にとっては上のメカニズムによる分散効果は働かないということである。このことは、このような地形による物質分散の効果をより複雑なものにすると言えるであろう。今後は、このような環流が実際にどの程度環流内に水を trap する効果を持つのかを、環流の種々のスケールや流速の大きさ等と関連させて、定量的に評価していきたいと考えている。

3.2 流量及び流量係数について

測線 L 2 における鉛直断面での流速測定の結果得られた流量、測点 A、D 間の水位差、及び流量係数を Fig. 10 に示す。各々、1 周期間の測定記録を 48 等分して読み取って得た値である。流量は上げ潮の向きを正に、水位差は A 点の水位が高い場合を正にとってある。一周期を通じての流量の変化は比較的きれいな正弦曲線を描いているが、水位差の変化の波形は若干歪んでいる。海峡部における流速の変動の位相は、海峡の長さが非常に短い場合を除き、一般に海峡の両側での水位差の変動より遅れると言われている³⁾が、Fig. 10 においても流量の変動の位相が若干遅れているのがわかる。

海峡の特性を表現する方法の一つに流量係数があるが、この値について検討してみよう。今、海峡を通過する流量を Q 、海峡の断面積を A 、海峡両側の水位差を h 、重力の加速度を g とすると、 $Q = CA\sqrt{2gh}$ の関係がある。 C は流量係数で、0~1 の値を取る。流量の変動が水位差の変動より遅れることを考慮して、流量の各位相における値に対し 5/48 周期前の水位差の値を対応させて、断面 L 2 における流量係数を求めた結果が Fig. 10 の C の値である。図中の×印は値が 1 を越えた点及び流れの向きと水位差が逆になった点である。この結果を見ると C の値は 1 周期を通じて変動しており、また下げ潮の場合は比較的一様な値を取るが上げ潮の場合に大きく変化していることがわかる。このように C が変動する原因としては、(1) 水位差に対する流量の応答の時間が 1 周期を通じて一定ではない、(2) C の値は本来流量によって異なる、(3) 水位差を求めた測点が適当でない、等が考えられる。これらのどの要因が支配的であるのかは、今後検討していく予定である。

4. あとがき

以上の結果明らかになったこと及び今後の問題点は次のようである。

- (1) 高浜瀬戸内部には潮流に伴い種々の環流が発生する。これらの一部は定常流においては発生しない。
- (2) 由良湾の水は環流によって trap され、環流の消滅期に集中的に主流域の水と交換する。このことは物質分散に大きな効果を持つ。
- (3) (2) は由良湾内の流速変動が主流域より遅れることによって起る。
- (4) 高浜瀬戸を通過する潮流の流量の変動は、瀬戸の両側での水位差の変動より遅れる。
- (5) 流量係数は、潮流の 1 周期の間一定の値を持たない。

今後検討すべき問題点として (1) における環流形成のメカニズムを明らかにすること、(2) において環流が水を trap する効果を定量的に評価すること、(5) の原因を明らかにすること等が挙げられる。これらの点について、更に実験を行ない、また現地観測等とも関連させて研究を進めていく予定である。

最後にこの研究を進めるにあたり貴重な助言・討論を頂いた愛媛大学工学部講師柳哲雄氏、実験に御協力頂いた京都大学防災研究所技官北川吉男氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Pritchard, D. W.: Dispersin and Flushing of Pollutants in Estuaries, Proc. ASCE, Vol. 95, No. HY1, 1969, pp. 115-124.
- 3) 中野猿人：潮汐学，古今書院，1940, pp. 316-322.

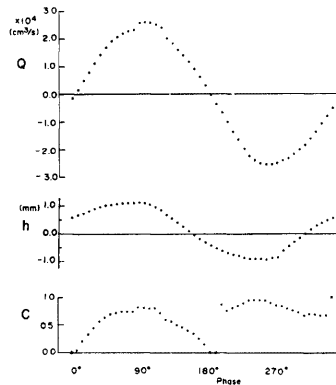


Fig. 10. Rate of flow through Takahama Straits (Q), difference of water level between Stn. A and Stn. D (h), and coefficient of rate of flow (C).