

閉鎖性湾域の海水交換に関する実験的研究

Experimental Study on the Tidal Exchange in a Semi-Enclosed Bay Area

今 本 博 健*・大 年 邦 雄*・井 上 慶 司**

Hirotake Imamoto, Kunio Ohtoshi and Keiji Inoue

Abstract: The tidal flow and exchange processes between rectangular-shaped pocket and tidal channel was investigated experimentally using a flow visualization technique. The spatial structure of the tidal flow field was found to exhibit marked variation through the course of the tidal cycle, with clear evidence of transient eddies and flow separation at the corner of the pocket. Such variation has a strong connection with the tidal exchange through the entrance of the pocket. A simple analysis of tidal exchange was presented and calibrated by experiments.

Keywords: Tidal Exchange, Semi-Enclosed Coastal Area, Non-Linear Tidal Flow

1. はじめに

湾口断面を通して湾内水と外海水が交換する現象を海水交換と定義する。この現象の主要な要因は地形性の水平循環流、潮流乱れによる乱流拡散および密度流による鉛直循環流であるが¹⁾、基本的には、流れによって運ばれたものが混合・希釈され、それがまた流れによって運ばれるという機構で説明される。このような海水交換が問題とされるのは、海岸線に沿うくぼみ状の湾や河川感潮域内の掘り込み港湾などのように、外部水域の流動に対して湾内での流動が著しく縮小された閉鎖性の極めて高い水域においてである。このような水域では、湾内水の滞留時間が長いことから、陸岸から湾内に供給された汚染物質等の拡がりあるいは湾外から湾口を通して供給される各種物質（微細土砂等）の拡散・堆積などの工学上の問題がある。これらの問題に対処するためには、水域周辺での水塊の流動および湾口を通しての水塊の交換等の基本的特性を十分把握しておくことが重要である。

本研究では、このような水域を外部水域の潮流方向に対して直角に開口した矩形状の湾として取り扱い、湾内の流動と海水交換について実験的に検討したものである。

2. 実験の概要

プランジャー式の起潮機を備えた縦 11.5m、横 5.3m の平面水槽内に、幅 80cm の水路と水路片側にくぼみ状の矩形湾を設置した（図-1）。湾幅 B と湾長 L は可変であるが、ここでは B=50cm、L=200cm の場合のみを対象とする。水深を $h=5.0\text{cm}$ とし、周期 $T=180\text{sec}$ の潮流を水路部分に与える。また、起潮機側の水路端から取水して反対側の水路端に供給する循環システムにより、一方向の恒流を水路部分に与えることができるようにしている。

対象とした実験条件を表-1 に示している。case-A および case-B は潮流のみを水路部分に与えた場合であり、大小 2 種類 (10mm と 5mm) の潮差条件を与えることによって、水路部分における潮流の tidal excursion を変化させている。case-C は case-B での潮流に一方向の恒流を付加し、恒流が海水交換に及ぼす影響を見ようとするものである。

これらの各ケースについて微小紙片 (5mm 角) および染料をトレーサとした可視化実験を行なった。まず、水面流況を写真撮影して種々の潮時における流速ベクトルを求め、格子点流速ベクトルに変換した。次に、着色および記号付け等によって識別可能とした紙片を湾内全域に適宜投入し、それらが湾口断面から流出するまでの時間を計測するという方法によって、個々の紙片の湾内滞留時間を求めた。また、湾内水あるいは湾外水を染料（ウラン）で着色し、着色水塊の挙動を追跡して各潮時毎の交換量を求めた。なお、いずれの実験においても、同一条件の下で数回繰り返し、それらの平均値を計測値とした。

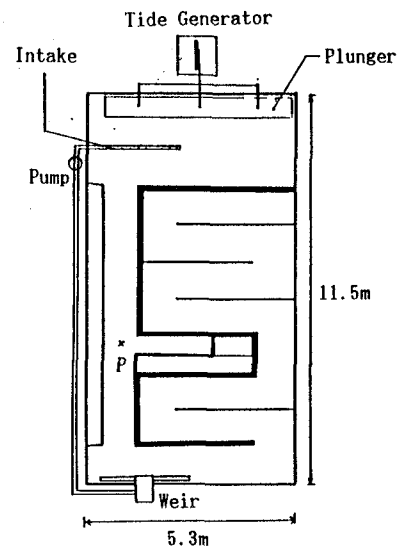


図-1 実験水槽概略図

* 正会員 京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所 (612 京都市伏見区横大路下三栖)

** 正会員 運輸省

表-1 実験条件

case	L (cm)	B (cm)	h (cm)	T (sec)	H (mm)	U _p (cm/s)	ℓ / B
A	200	50	5.0	180	10.0	0.0	14.4
B	200	50	5.0	180	5.0	0.0	5.3
C	200	50	5.0	180	5.0	2.7	6.3

L : Length of the basin	H : Tidal range of outer currents
B : Breadth of the basin	U_p : Velocity of permanent flow
h : Mean water level	$\mathcal{Q}$: Tidal excursion of outer currents
T : Tidal period	

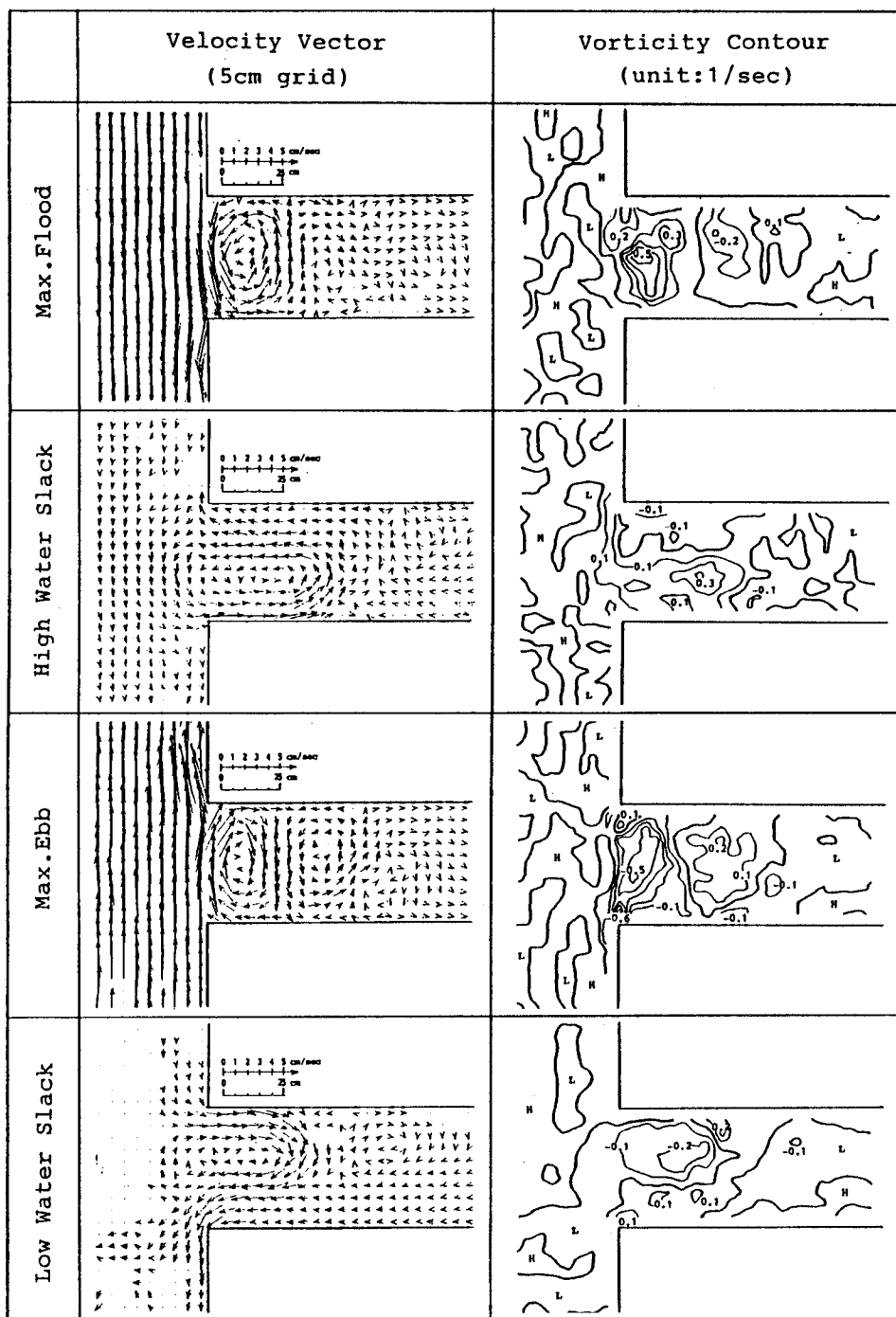


図-2 流速ベクトルおよび渦度分布 (case-B)

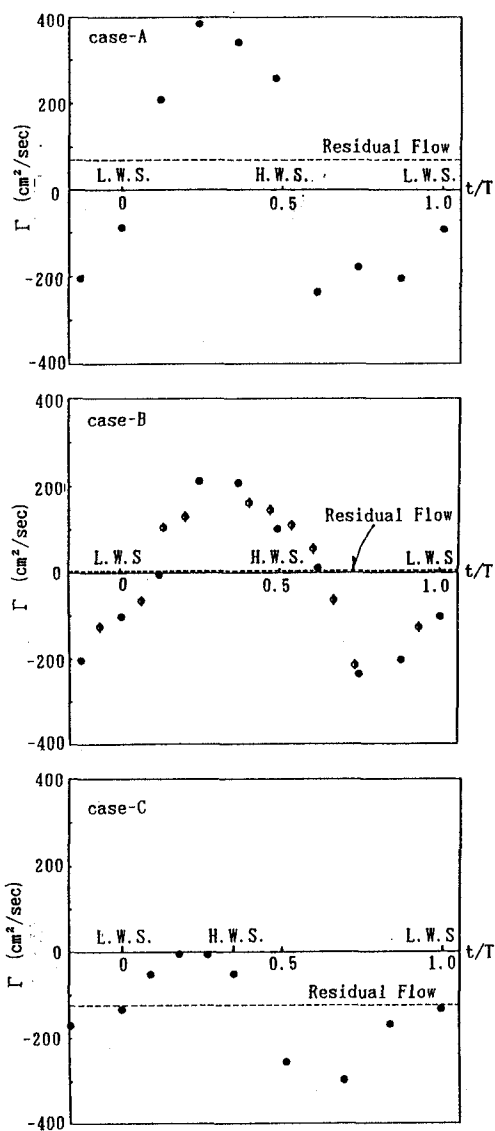


図-3 湾内循環の時間的变化

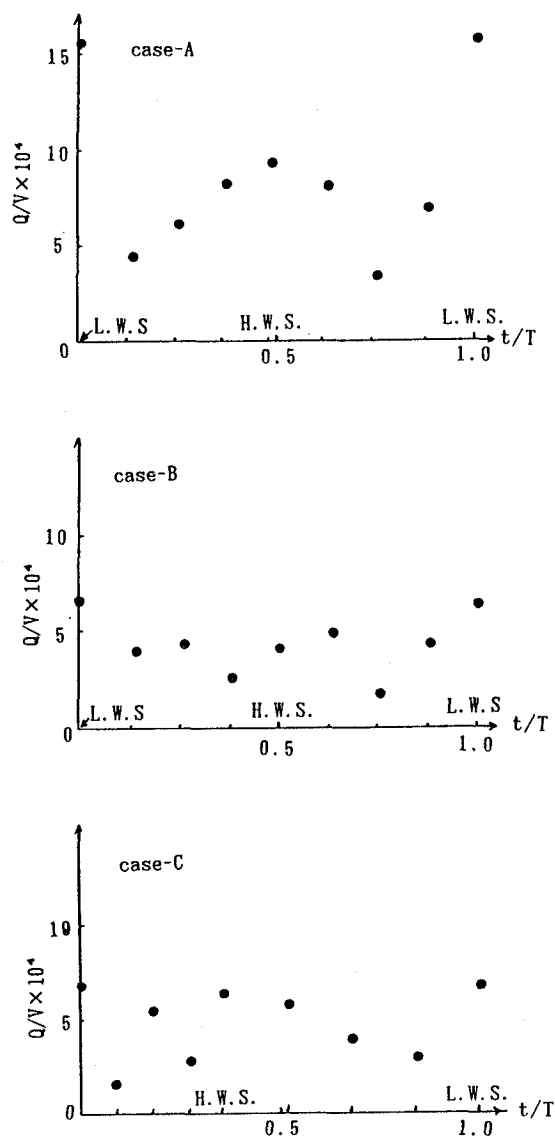


図-4 交換流量の時間的变化

3. 潮流場の時間的变化と海水交換

代表ケースとして、case-Bにおける潮流速ベクトル場の時間的变化を図-2に示している。上げ潮時および下げ潮時には、それぞれ回転方向の異なる環流が湾口付近に生成され、湾幅スケールにまで成長している。湾外潮流が最盛のとき湾口断面には非常に強いシェアーが働き、湾内は閉鎖性の極めて高い（流動の小さい）水域となっている。このような特性は各ケースに共通して認められるが、潮流場の時間的变化をさらに詳しく記述すると次のようである。

本実験で対象とした各ケースにおける潮流場の基本的特徴は、湾口付近に形成される渦流である。この渦流は、潮流が湾口の隅角部で剥離して放出される流れの不連続面が湾内に巻き込まれて形成されている。剥離によって形成された渦流は湾外流速の増大とともに発達し、湾口幅のスケールをもつ渦流（環流）へと成長している。湾外流速が減少してゆくと、成長した渦流（環流）はそのスケールを保持したまま次第にその流速を減じてゆくが、転流時を迎えても流速は零にはならず、湾外へ若干押し出された格好で残っている。その時、湾口断面両端部からそれぞれ流出する流れと流入する流れが生じ、湾内外水の交換が相対的に顕著である。転流後はもう一方の隅角部から生成される剥離渦流の成長とともに先の環流は消失し、回転方向の異なる新たな渦流が湾口付近を占めるようになって、それが湾口幅スケールをもつ環流へと発達している。この環流も湾外流速の減少とともに流速を減じ、転流時には湾外へ若干押し出された格好の環流となっている。湾外に恒流の付加されたcase-Cでは、上げ潮時に形成される環流のスケールが他のケースのものほど大きく発達していない。

上述した剥離渦流の1周期内における変化は、『不連続面→剥離渦流の生成→環流へと発達→環流の減衰→消滅→不連続面→』のように要約され、湾内外の海水交換の機構（交換量）は、剥離渦流のライフサイクルに

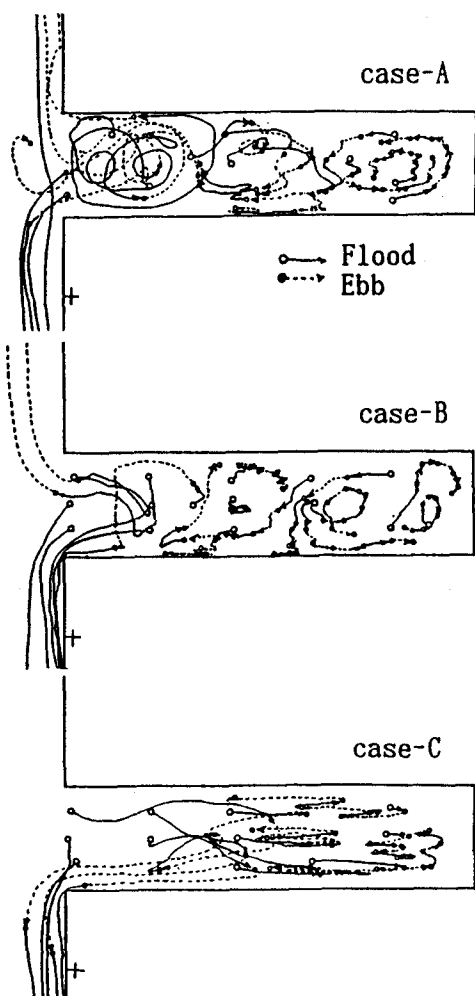


図-5 1周期間の流動軌跡

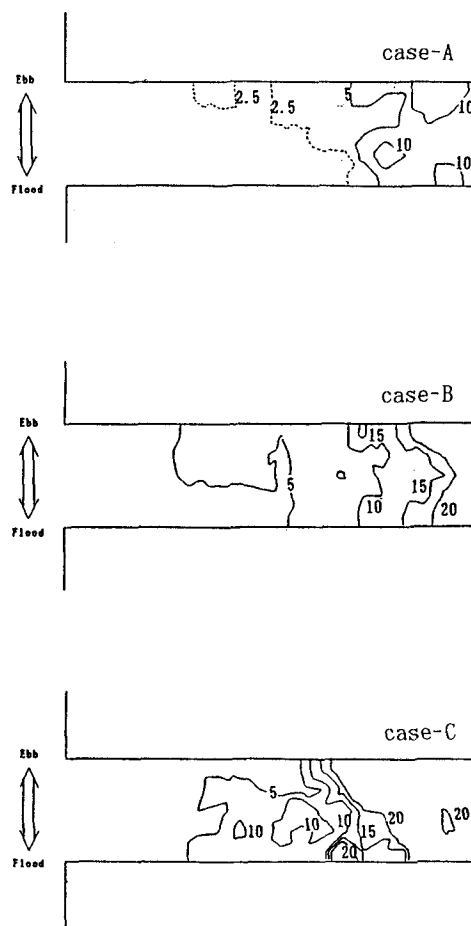


図-6 滞留時間の分布

対応して説明される。

このことを潮流場の渦度方程式を介して検討する。本実験で対象とした潮流場の支配方程式は1次の摩擦係数 R を用いて次のように表わされる²⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + Ah \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{R}{h} U \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + Ah \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{R}{h} V \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + h \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 U および V はそれぞれ x および y 方向の水深平均流速、 ζ は平均水面からの水位変量、 h は平均水深、 Ah は水平方向の渦動粘性係数である。このとき、渦度 ω ($= \partial V / \partial x - \partial U / \partial y$) は次のように表わされる²⁾。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \frac{\partial \omega}{\partial x} + V \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{\omega}{h} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + Ah \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \frac{R}{h} \omega \quad \dots \dots \dots (4)$$

次に、湾内領域の循環 Γ (その殆どは図-2に示した湾口環流の循環である) について考える。湾内領域を D 、境界を S とすると、式(4)より式(5)が得られる。

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = - \int_S \omega u_n ds + Ah \int_S \frac{\partial \omega}{\partial n} ds - \frac{R}{h} \Gamma \quad (\Gamma = \iint_D \omega dx dy) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 ds は境界 S に沿う線素、 u_n は S に垂直外向きの速度成分、 n は S に外向きの法線である。湾口境界を除く各境界では、 $u_n=0$ 、 $\partial \omega / \partial n = 0$ であるから、式(5)のもつ物理的な意味は次のように説明できる。『生成・発達・消滅を繰り返す剥離渦流のもつ循環の時間的変化(左辺)は、湾口境界からの流入水塊が運び込む渦度(右辺第1項)、湾口境界の不連続面から拡散する渦度(右辺第2項)および底面摩擦によって逸散する渦度(右辺第3項)の三者によって決定される。』図-2に示した流速ベクトル場の力学構造もこのように表現される。

湾内循環 Γ と湾内外の交換流量 Q の1周期内における時間変化を示すと、それぞれ図-3および図-4のようである。これより、湾外潮流が最盛で湾内に顕著な環流が存在する時には交換量が小さく、逆に、環流の消滅する転流時付近での交換量が大きいことがわかる。すなわち、湾内外の海水交換量は剥離渦流のライフサイクルに対応して周期的に変化している。湾外に恒流の付加されたcase-Cでもこのような傾向は認められるが、case-A,Bほど顕著ではない。

4. 湾内水の流動パターンと滞留時間分布

水面トレーサの上げ潮・下げ潮期間のラグランジュ的流動軌跡の追跡結果を図-5に示している。湾口付近では、そこに形成される環流に乗って1周期以内に殆どのトレーサが湾外に流出している。それより湾奥側では、潮流のみのcase-A,Bでは流速の微弱な循環流が観察されるのに対し、潮流と恒流の共存するcase-Cでは往復流動が観察されるのが特徴である。しかし、いずれのケースにおいても湾中央より湾奥側での流動は微弱である。図-6に示した湾内各地点に対する滞留時間の分布は、上述した流動特性を如実に反映しており、湾口付近の環流領域よりも湾奥側での滞留時間が極度に長く、湾奥では非常に微弱な流動が物質分散に寄与していることがわかる。

湾内全域に対する平均滞留時間を求めると、case-A,B,Cの順に5.1T, 10.3T, 16.3Tであって、潮流と恒流の共存するcase-Cでの平均滞留時間が潮流のみのcase-Bの場合よりも長いという興味深い特性を示している。

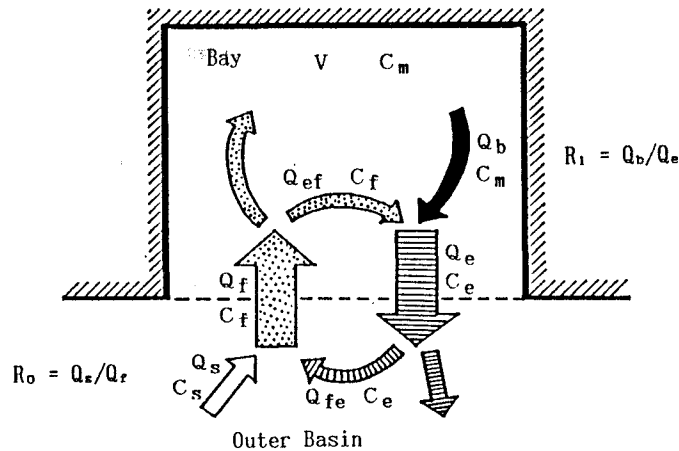


図-7 海水交換過程の模式図

5. 海水交換現象の定式化

本研究で対象とした潮流場における海水交換過程を模式的に示したものが図-7である。すなわち、上潮時に湾へ流入する水塊の容積 Q_r は、直前の下潮時に流出した水塊の一部 Q_{re} と元々湾外にあった水塊 Q_s とから構成され、同様に、下潮時に湾から流出する水塊の容積 Q_e は、直前の上潮時に流入した水塊の一部 Q_{er} と元々湾内にあった水塊 Q_b とから構成されているとする。湾内水の平均濃度 C_m の時間的変化率(時間の単位は潮汐周期)は、 N_t を潮汐数(t/T)として次のように表わされる。

$$dC_m / dN_t = (Q_r C_r - Q_e C_e) / V \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{上潮時における水塊の組成より、} \quad Q_r = Q_s + Q_{re} \quad \dots \dots (7) \quad Q_r C_r = Q_s C_s + Q_{re} C_e \quad \dots \dots (8)$$

$$\text{下潮時における水塊の組成より、} \quad Q_e = Q_b + Q_{er} \quad \dots \dots (9) \quad Q_e C_e = Q_b C_m + Q_{er} C_r \quad \dots \dots (10)$$

日潮不等などの潮汐の不規則性を無視し、下に定義する2種の交換係数 R 。および R_1 を導入する。

$$Q_r = Q_e \quad \dots \dots (11) \quad R_0 = Q_s / Q_r \quad \dots \dots (12) \quad R_1 = Q_b / Q_e \quad \dots \dots (13)$$

以上の諸式より、式(6)は次のように書き表わされる。

$$dC_m / dN_t = \alpha (C_s - C_m) \quad \dots \dots (14) \quad \alpha = R_0 R_1 Q_r / \{ 1 - (1 - R_0)(1 - R_1) \} V \quad \dots \dots (15)$$

上式を $N_t = 0$ のとき $C_m = C_0$ の条件下で解き、さらに $C_s = 0$ と置くと、

$$C_m / C_0 = \exp(-\alpha N_t) \quad \dots \dots \dots (16)$$

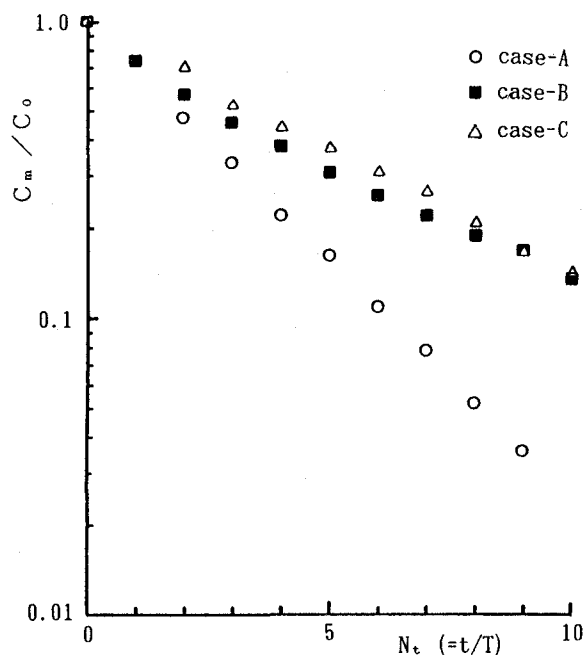


図-8 湾内平均濃度の時間的变化

式(16)は、初期に濃度 C_0 であった湾内水が、湾口での海水交換によって次第にその濃度を減じてゆく過程を表わしている。湾内水の平均滞留時間 τ_r は、式(16)を $N_t=0 \sim \infty$ で積分することにより、次のように得られる³⁾。

$$\tau_r = 1/\alpha \quad \dots\dots\dots (17)$$

対象とする湾の容積 V およびtidal Prism Q_r を評価することは比較的容易であるが、交換係数 R_0 と R_1 は何らかの観測によって評価する必要がある。

ここでは式(16)の妥当性を検討するために次のような実験を行った。すなわち、湾口断面を仕切って湾内に一様な初期染料濃度を与えた後、干潮憩流時に仕切り板を開放して一周期後に再び湾口を閉め、湾内水を混合して湾内平均濃度を計測し、再び干潮憩流時に仕切り板を開放するという手順を繰り返して行なって、湾内平均濃度の時間的变化を計測した。その結果が図-8に示されている。各計測値は片対数紙上で直線を形成しており、このことは式(16)の妥当性を示している。同図より係数 α を算定すると、case-A,B,Cの順に 0.368, 0.212, 0.201 であって、4. に示した結果と定性的に一致しているが、定量的には一致していない。その原因は、湾内平均濃度を計測するために湾口断面を仕切って湾内水を混合したことであって、今後実験方法を改良して定量的な検討を行う必要がある。

6. おわりに

本研究は、外部水域の潮流方向に対して直角に開口した矩形状の湾を対象として、湾内の流動と海水交換について実験的に検討したものである。対象とした各ケースにおける潮流場の基本的特徴は、湾口付近に形成される渦流であって、この剥離渦流の1周期内における変化は、『不連続面→剥離渦流の生成→環流へと発達→環流の減衰→消滅→不連続面→』のように要約され、湾内外の海水交換の機構(交換量)は、剥離渦流のライフサイクルに対応していることがわかった。すなわち、湾外潮流が最盛で湾内に顕著な環流が存在する時には交換量が小さく、逆に、環流の消滅する転流時付近での交換量が大きいことがわかった。湾外に恒流の付加された場合にも、このような傾向は認められるが、それほど顕著ではなかった。湾内全域に対する平均滞留時間では、潮流と恒流が共存すると、潮流のみの場合よりも長くなるという特性が見いだされた。

今後さらに詳細な現象計測を実施するとともに、数値シミュレーションによる予測も含めて、現場での予測に有効な解析法を模索してゆく必要がある。

参考文献

- 1) Fischer et al.: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, Inc., 1979.
- 2) 柳 哲雄: 沿岸海洋学, 第6章, 恒星社厚生閣, 1989.
- 3) Takeoka, H.: Continental Shelf Research, 3, pp.311, 1984.