

大阪湾停滯性水域の流動と水塊構造

上嶋英機*・湯浅一郎**・宝田盛康***
橋本英資****・山崎宗広****・田辺弘道**

1. まえがき

これまで、瀬戸内海を対象として水質汚濁に直接関与する物理的浄化能力や緩衝容量を把握するため、各水域の空間スケールに応じた海水交換規模を明らかにしてきた^{1),2)}。その結果、瀬戸内海には地理的、物理的な条件により規定される閉鎖的な海域が多く存在し、その海域には海水交換性が悪く、汚濁の著しい停滯性水域が多く分布していることが分った。一方、沿岸海域の海洋開発が進行する中で、対象となる海域は閉鎖的で停滯性の強い水域が多く、開発と環境保全との両立が強く望まれている。このため、本研究はこのような停滯性水域の流動と水質環境を工学的立場から人為的手法により改善し、湾全体の適正環境を創造するための流況制御技術を検討することを目的として進めている。そこで先づ、瀬戸内海の中でも特に停滯性の強い大阪湾奥部を対象として、成層が著しく発達し、貧酸素水塊が形成される夏季において、停滯性水域内の流動と水塊構造を明らかにする調査を行った。本論文では、この調査結果を紹介し、解析から明らかとなった停滯性水域内の閉鎖型循環流の構造及び、物質輸送特性について示すものである。

2. 観測内容

図-1 の大阪湾内環流(恒流)分布に示すように、大阪湾内には明石海峡からの流れにより、湾内 20 m 水深を境に西部海域には大きな時計廻りの循環流が存在し、友ヶ島水道からの流域と接合している¹⁾。これら環流域に閉じ込められるように湾東部海域には河川水の影響を強く受ける停滯性水域が見られる。

そこで、この東部停滯性水域を対象として、1985 年 9 月 3 日から 5 日に集中して、図-2 に示す測点位置にお

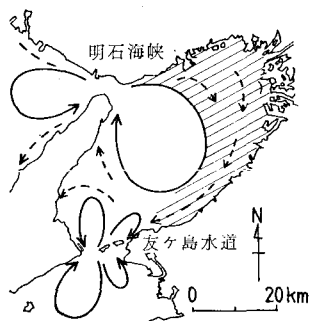


図-1 大阪湾内の環流分布と停滯性水域模式図

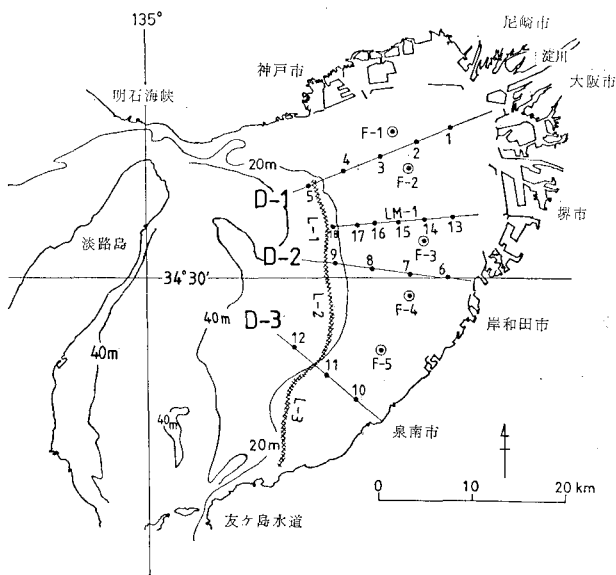


図-2 大阪湾停滯性水域調査位置図

いて以下の 3 項目の観測を行った。

①水塊分布調査では、湾内西部の循環水域と東部停滯水域の水塊分布と、両水塊の間にあるフロント位置を航空機による MSS 撮像により行い、更に、数隻の走行船でフロント部を横断する方向に、水温、塩分、DO の鉛直分布を L-1, 2, 3 区域で 9 月 3 日に観測した。

②浮標追跡調査では停滯性水域内の物質粒子の移動を

* 正会員	工博	通産省中国工業技術試験所	海洋工学研究室長
**	理修	通産省中国工業技術試験所	海洋工学研究室主研
*** 正会員	工修	通産省中国工業技術試験所	海洋工学研究室主研
**** 正会員		通産省中国工業技術試験所	海洋工学研究室

直接的に捉えるため、図-2に示す F-1~F-5 の5測点で上層 1m と下層 2m の2層に各々1個の円板型浮標を同時投入し、その移動を1潮汐間、船で追跡した。この観測は9月5日7時の上げ潮時にスタートし19時まで実施された。この間、風速は 2m/s 以下と微風であった。

③水域内横断定点観測では、図-2に示すように、水域内を東西に横断する3測線を、淀川河口沖 D-1 断面(St. 1~5)、岸和田沖 D-2 断面(St. 6~9)、泉南沖 D-3 断面(St. 10~12)に設け、12測点に各1隻の船を配置して鉛直方向に7層(0, 1, 2, 3, 5, 10m 海底上 1m)について、水温、塩分、DO、流れを測定した。この観測は、9月3日、4日の日潮不等の少ない中潮期の2潮汐間にわたり、1時間毎25回連続して行った。

3. 観測結果

(1) 停滞性水域の水塊分布とフロント形成

図-3は9月13日、明石海峡東流時末期の MSS 撮像から得た海面温度分布のスケッチである。神戸沖から南の泉南沖まで張り出した等温線より東側の領域の高温水域が赤潮状態の停滞性水域に相当するものである。この水塊は湾全体の約 1/2 にもなる広域なもので、西部循環水域の水塊との遷移領域であるフロント部は非常に明確である。

図-4にはフロントを横切る方向に船を走行させ測定し得た海面の水温記録である。東部停滞性水域側での水温は 29.5°C、フロントを通過し、西側循環流水域では 27.3°C と 2°C 以上のシャープな温度差を持つこのフロントは南北に約 30 km にも連っていた。

このように広域に分布する停滞性水域の水塊構造を、鉛直面で見たのが図-5である。

図-2に示す堺沖の LM-1 測線(St. 13~17)での塩分 S、水温 T、溶存酸素 DO、現場密度 σ_t

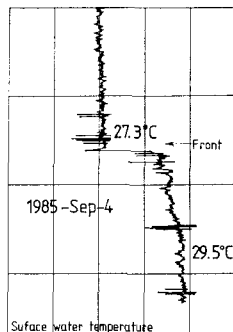


図-4 フロント部の表層水温記録



図-3 海面温度画像から的大阪湾停滞性水域のスケッチ

の鉛直分布からは、フロントの位置する St.16 から堺沖にかけて密度成層が著しく、上層には高温、低塩分、DO 過飽和な水塊が分布し 10m 以深の底層には低温・高塩分な貧酸素水塊が存在している。この貧酸素水塊は湾奥部に相当広範囲に分布していることが、これまでも明らかにされている³⁾。

(2) 停滞性水域内のラグランジュ的流動構造

停滞性水域内の5測点(F-1, ~F-5)での浮標追跡から得た流跡図を図-6に示す。1m 層と 10m 層で浮標の移動経路と速さが全く異っている。当日(9月5日)の明石海峡の流れは、11時西流最強、15時転流、18時東流最強であった。図-6で明らかにように、上層 1m の浮標は、F-2 で北流から南流に、F-3 では北流から東流になるが、F-1, F-4 は転流せず南へ向けて流れる。一方、下層 10m の浮標は F-1, 2, 5 であまり移動しないが、F-3, F-4 は共に明石の西流時でも南流し、1潮

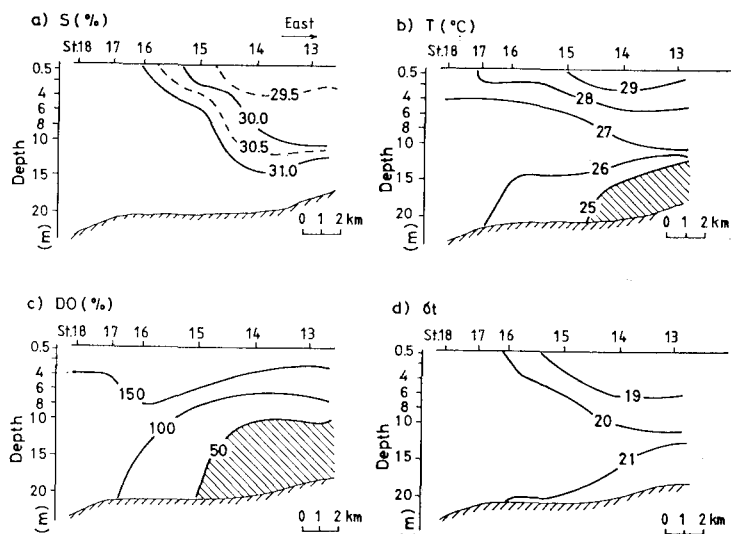


図-5 停滞性水域内走行調査 LM-1 ラインでの水温、塩分、DO、 σ_t の鉛直断面図(1985年9月3日)

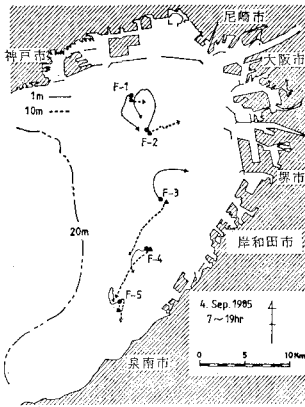


図-6 浮標追跡による移動経路図

日間での移動距離は F-3 で 5.3 km, F-4 で 4.8 km に達し, 平均移動速度は 10~12 cm/s と予想外に速い値が観測された。F-3 での 1 m 層と 10 m 層の移動形態の相違は水域内の残差流が鉛直方向に大きく異なることを示すものである。なお, F-5 では上下層ともほとんど移動が見られない。

(3) 停滞性水域内の流動・水塊構造

停滞性水域内を東西に横断する 3 断面で, 昼夜 2 潮汐間の定点観測が 9 月 3, 4 日に実施されたが, この期間における大阪港の潮位記録からは日潮不等のない中潮期で干満差は約 90 cm であった。泉南沖の MT 局での風向風速記録では, 平均風速が 3 m/s 以下であった。淀川河川流量は約 120 m³/s であった。

図-7 は, 明石海峡西流最強時 (11 時) と東流最強時 (17 時) での上層 1 m と下層 10 m での停滞性水域内の流速ベクトルの分布図である。西流最強時には神戸沖測点の上層で強い北流が見られる。しかし, 淀川河口沖か

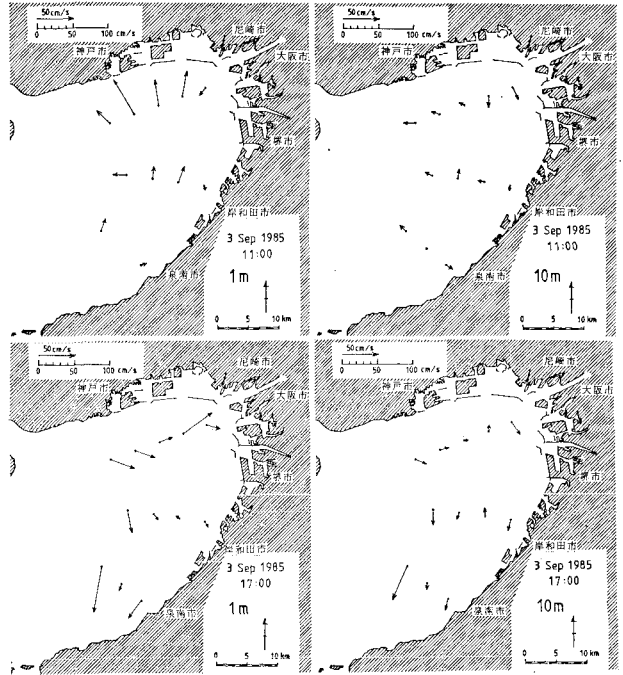


図-7 大阪湾東部における流速分布

左上: 明石海峡, 西流最強時 (1 m 層)

右上: 明石海峡, 西流最強時 (10 m 層)

左下: 明石海峡, 東流最強時 (1 m 層)

右下: 明石海峡, 東流最強時 (10 m 層)

ら堺沖までの海岸線寄りの領域では, 上下層とも南流している。これに対し, 東流最強時には全体的に時計廻りであるが, 明石海峡からの大きな循環流の影響を受けて, D-1 測線の上層では, 神戸沖から淀川河口に向かって速い流れが認められる。しかし, 下層では淀川河口沖 (St. 2) 及び堺沖 (St. 7) では逆に北流が見られる。

図-8 には各測点での流れを 2 潮汐間 (25 時間) 平均した流速ベクトルの平面分布を 1 m, 5 m, 10 m 層について示したものである。この分布によると, 各横断測線

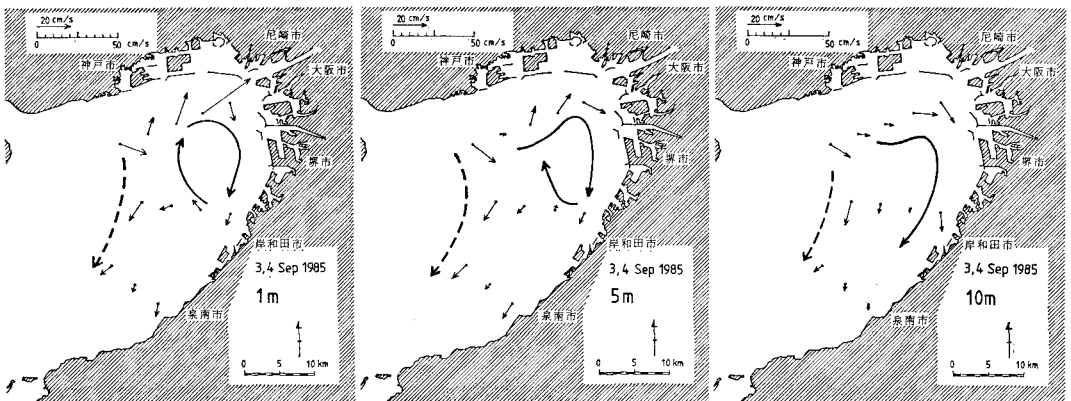


図-8 大阪湾停滞性水域内の 25 時間平均流速分布 (左: 1 m 層, 中: 5 m 層, 右: 10 m 層)

の湾中央寄り測点 St. 5, 9, 12 では、湾西部循環流の影響を持つ時計回りの流れが存在し、湾東部停滞水域と共に Shear を持つ壁を形成していると見られる。この位置はほぼ 20 m 水深の位置に相当し、前述のフロントが形成されていた領域でもある。

一方、停滞性水域内の湾東部側では、1 m と 5 m 層の平均流分布から、淀川河口沖から岸和田にかけての領域に直径 10 km 程の時計回りの循環流が明確に存在している。この循環流は 10 m 層までは及んでいない。これまで、淀川河口沖には夏季の成層期に循環流の存在が予想され、貧酸素水塊形成のシミュレーションで取り上げられた例⁴⁾はあるが、今回のように実際の存在を確認した調査結果は得られていなかった。その上、循環流の発生源及び規模については、淀川河川水の流出に伴う要因が大きいと考えられ、小規模な循環流が間欠的に発生するものと思われていた。しかし、図-8に見られる循環流の規模は大きく、淀川河川流量の少ない中で存在していたことに注目すべきであり、その要因は潜在的な流動場と密度成層場にあると考えられる。この循環流は停滞性水域内にあって富栄養な河川水を一定期間取り込み滞留することから、物質収支や生態系に与える影響は大きく、このため循環流水域で強く発生する貧酸素水塊の形成機構を裏付ける大きな要因となる。更に、湾東部の停滞性水域全体の水塊形成にとってこの循環流の役割は重要で、水塊内の物理的バランスを保つ作用を持ち、水塊内の核となっていると考えられる。従って、停滞性水域は単なる淀みではなく、その中に存在する循環流によって物理的に閉鎖された水塊と言える。このため、このような循環流を「閉鎖型循環流」と定義する。

図-9には各断面内の平均流速分布(左図)と平均塩分分布(右図)を示す。流速値は各横断面に直角成分の流れで、正が北流(図中の斜線部)、負の値が南流を示す。D-1断面では淀川河口寄りの St. 1 及び沖合 St. 5 では 10 cm/s 以上の南流を示す。しかし横断面中央の St. 2, 3, 4 では上層から 10 m 水深まで北流を示し特に、St. 3 の上層では 10 cm/s 以上の速い北流が存在し、下層では南流があり上下層で 2 層流を形成している。このため、D-1断面内では水平、鉛直方向に強い Shear が発達すると見られる。D-2断面でも D-1断面と同様、中央の St. 7 を中心として 10 m 以浅が北流、下層で南流を示している。D-3断面では 2 層流は見られず、全体に南流となって流れは遅くなっている。これらから、D-1, D-2断面中央に位置する北流域が、閉鎖型循環流

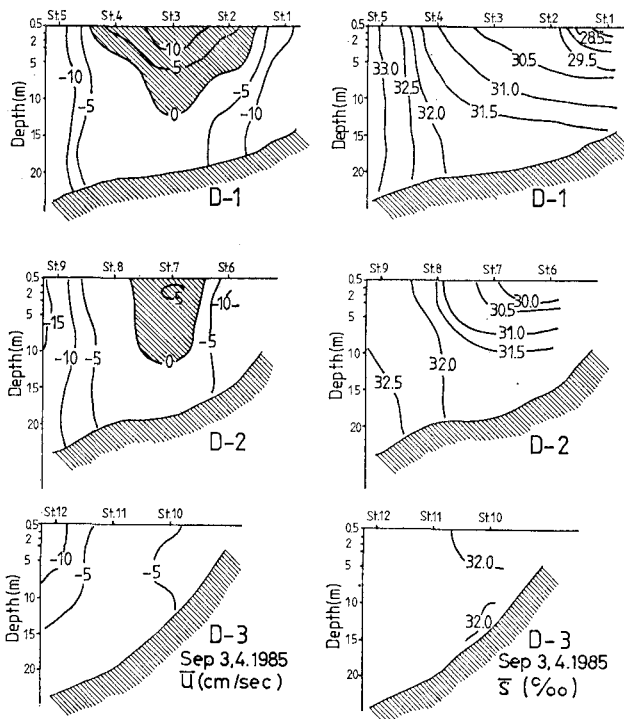


図-9 25時間平均流速断面分布(左)と平均塩分断面分布(右)
(1985年9月3日~4日)

の存在をより明確に示すものである。

平均塩分値は D-1, D-2 断面とも 32 ‰ を境に、東部側で低塩分の水塊が分布し成層を形成している。岸沿に南下する低塩分水が再び北流により戻されることにより、水域内の塩分が低下していく。D-3 断面の塩分濃度は均一でありよく混合されている。

4. 停滞性水域内の物質輸送特性

横断定点観測資料に基づき、D-1, D-2, D-3 断面を通しての塩分輸送量を算出し、停滞性水域内の輸送特性を明らかにする。

(1) 塩分輸送量の算出法

塩分輸送量の算出法についての詳細は、これまでの報告⁵⁾に譲り、ここでは特に、水域内の閉鎖型循環流による輸送特性を明らかにすること重点を置き、水平・鉛直方向の Shear 分散による輸送を取り扱う。

そこで、断面に直角成分の流速 u 、塩分 s 、断面積 A とすれば、各要素は次のように分解される。

$$\left. \begin{aligned} A &= \bar{A} + A_1 \\ u &= \bar{u}_A + U_A + u_A, \quad s = \bar{s}_A + S_A + s_A \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

断面内を格子状にとり、 u , s は各格子の代表点での値で実測値から内挿し、潮汐変動を考慮した断面積 A の平均値(添字 $\bar{A}$)と 1 潮汐平均値(横棒)を求めた。

ここで、 A_1 は断面積の変動量、 U_A は断面平均潮流、 $\bar{u}_A$ は1潮汐断面平均流(断面平均恒流)、 u_d は断面内の Shear 成分である。この u_d をさらに水平成分 u_{dt} と、鉛直成分 u_{dv} に分解し $u_d = u_{dt} + u_{dv}$ とする。塩分 s についても同様に分解する。

断面を通しての平均塩分輸送量は $\bar{F} = \overline{A(uS)_A}$ であり、(1) 式及び、前記の成分を考慮し分解し、これまでの経緯から主要な輸送項を上げれば次式となる。

$$\bar{F} \approx \underbrace{\bar{A}\bar{u}_A\bar{s}_A}_{T_1} + \underbrace{\bar{A} \cdot U_A S_A}_{T_2} + \underbrace{\bar{A}(\overline{u_{dt} \cdot s_{dt}})_A}_{T_3} + \underbrace{\bar{A}(\overline{u_{dv} \cdot s_{dv}})_A}_{T_4} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで右辺の各輸送項は、 T_1 が平均流による輸送項、 T_2 は潮汐流の trapping による輸送項、 T_3 、 T_4 は断面内の水平、鉛直 Shear による輸送量を意味し、 T_3 は特に水平勾配分散項、 T_4 が鉛直勾配分散項である。

(2) 塩分輸送量の算出結果

表一には D-1, 2, 3 断面での2潮汐間平均塩分輸送量の算出結果と断面平均恒流 $\bar{u}_A$ と塩分 $\bar{s}_A$ の値を示す。 u_d の値は全て南流(負値)を示し D-1 で大きく D-3 で小さい。この値は浮標追跡で見られた F-3, F-4 の下層の平均流速 10~12 cm/s に比べて小さいものである。塩分 S_A は D-1 で低く、D-3 に高い勾配を持つ。

各断面内の塩分輸送量の内訳として T_1 の輸送量は支配的である。分散項として T_2 の trapping flux は全体に小さい。Shear 分散項(T_3 , T_4)の値は D-1 断面で最も大きく、D-2 断面では水平勾配分散項 T_3 が大きく寄与している。この結果から、先に示した閉鎖型循環流の存在が、D-1, 2 断面での分散効果として示されていることがわかる。D-3 断面では T_3 , T_4 は共に小さく Shear の少ない海域であることを示している。

表一 塩分輸送量の算出結果

	$\bar{U}_A$	$\bar{S}_A$	$\bar{F}$	T_1	T_2	T_3	T_4
断面	cm/s	‰	ton/s				
D-1	-5.7	31.66	-736.6	-722	-0.5	-7.0	-7.2
D-3	-5.4	31.81	-551.9	-546	0.6	-5.4	-0.8
D-2	-4.4	32.14	-339.0	-339	<0.1	0.3	0.2

次に、3 断面での輸送量算出結果を基に、湾東部海域がフロントで閉鎖された南北に長い水域と仮定して、一次元の Shear 分散係数を次式により算出した。

$$K = - \frac{(T_3 + T_4)}{\partial \bar{s}_A / \partial X} \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式の分子 $T_3 + T_4$ は D-2 断面での単位面積当りの

輸送量により算出した。その結果、 $K = 8 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の Shear 分散係数が得られた。

5. 結 語

大阪湾東部に存在する停滞性水域内の流動、水塊構造を明らかにするため、夏季成層期に現地観測を実施し、その調査資料の解析結果から、次の特性が明らかとなった。

(1) 大阪湾東部海域には湾を東西に二分する大規模なフロントが神戸沖から泉南沖までの南北に形成され、フロントから東側には赤潮の発生を伴う停滞性水域が確認された。水域内は貧酸素水塊と密度成層を形成していた。

(2) 浮標追跡調査によれば、停滞性水域内の上下層の海水移動経路は大きく異なり、特に堺、岸和田沖の下層は1潮汐間で 4.8~5.3 km も南流し、その平均速度は 10~12 cm/s にもなる速い流れが認められた。この結果、残差流の形成過程が鉛直方向に大きく異なることが分った。

(3) 停滞水域内には淀川河口沖から岸和田沖にかけて直径約 10 km の閉鎖型循環流の存在が初めて確認され、水塊内の物質収支や生態系に大きく関与し、貧酸素水塊形成の要因となっている可能性が明らかとなった。

(4) 上記、循環流が存在する横断面を通しての塩分輸送量の算出結果では、水平及び鉛直 Shear による輸送量が大きく示された。一次元分散係数として Shear 分散による値として $K = 8 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ が得られた。なお、3 断面での断面平均恒流は 5.6~4.4 cm/s の南流を示した。

本研究は環境庁一括計上の公害防止技術特別研究による「潮流制御による瀬戸内海環境保全技術に関する研究」の一環として行ったものである。

参 考 文 献

- 1) 上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・宝田盛康: 瀬戸内海の海水交換機構, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 665~669, 1984.
- 2) 上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・宝田盛康: 湾内水塊の海水交換性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 571~575, 1986.
- 3) 城久: 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産におよぼす影響について, 大阪府水産試験場研究報告, No. 7, pp. 9~13, 1986.
- 4) 熊谷幹郎・西村肇: 大阪湾の貧酸素水塊形成のシミュレーション, 月刊海洋科学, Vol. 10, No. 10, 1978.
- 5) 上嶋英機・早川典生: 河川水の流出する湾内の分散機構, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 492~496, 1980.