

## 広島湾北部海域におけるエスチュアリー循環過程\*

山本 民次\*\*・芳川 忍\*\*・橋本 俊也\*\*・高杉 由夫†・松田 治\*\*

Estuarine Circulation Processes in the Northern Hiroshima Bay, Japan

Tamiji Yamamoto, Shinobu Yoshikawa, Toshiya Hashimoto,

Yoshio Takasugi and Osamu Matsuda

本研究では、広島湾北部海域底層における流速の実測値をボックスモデルに取り込むことにより、当該海域の海水交換に対する河川水流入にともなうエスチュアリー循環の大きさを見積もった。広島湾北部海域に流入する淡水の98%は河川水であり、そのうちの約90%が太田川からの供給によるものであった。この河川水流入にともなうエスチュアリー循環による南部海域からの移流流量は $0 \sim 320 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ と計算され、河川水流入量に対して平均で7倍、最大で14倍と見積もられた。北部海域の海水交換のほとんどは、このエスチュアリー循環によって行われている。エスチュアリー循環は次のような機能を有していると考えられる。すなわち、河川水中の栄養塩濃度が高く南部海域底層の栄養塩濃度が低い場合には、エスチュアリー循環は北部海域環境の浄化として作用するが、河川水中の栄養塩濃度が低く南部海域底層の栄養塩濃度が高い場合には北部海域の生物生産を促進する。このことから、エスチュアリー循環は当該海域の生物生産の恒常性を保つという重要な役割を担っていると推測される。

Magnitude of estuarine circulation in the northern area of Hiroshima Bay was estimated by incorporating current velocity measured in the lower layer into a box model. Riverine input contributed 98% of the total freshwater input into the area, and of them, 90% was from the Ohta River. Entrained seawater volume by the estuarine circulation was estimated to be  $0 \sim 320 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ . The average and maximum volume of seawater entrained was 7 times and 14 times larger than the riverine freshwater input, respectively. This means that the water exchange in the northern area is performed mostly by the estuarine circulation. Estuarine circulation is assumed to have a characteristic feature that it works as a purifier of the environment in case of high nutrient concentration in the river water and low nutrient concentration in the entrained water, and on the other hand, it functions as an eutrophier in case of reverse conditions. This process is considered to play an important role on the stability of biological production in the bay.

キーワード：エスチュアリー循環，広島湾，ボックスモデル

### 1. はじめに

厳島(宮島)と江田島・西能美島とによって挟まれたナサビ瀬戸以北の広島湾北部海域では、一級河川である太田川その他、瀬野川、八幡川などから淡水が流入し、大阪湾と並びしばしば冬季においても塩分層が発達することが知られている(日本海洋学会, 1985<sup>1)</sup>; 橋本ほか, 1994<sup>2)</sup>)。このような海域においては、上層で湾口に向かって流出し、下層で湾奥に向かって流入する鉛直循環をとともなう「エスチュアリー循環」が発達する(Rattray and Hansen, 1962)<sup>3)</sup>。藤原(1997)<sup>4)</sup>は、伊勢湾や大阪湾

のような河川水の流入する内湾ではエスチュアリー循環が発達しており、湾内の物質輸送を支配していることを報告している。

本研究では、広島湾北部海域底層における流速の実測値をボックスモデルに取り込むことにより、当該海域への河川水流入にともなうエスチュアリー循環の海水交換に果たす役割の重要性を評価することを試みる。

### 2. 資料および解析方法

広島湾は南北に環境傾斜が強い傾向にあることが指摘されている(橋本ほか, 1994)<sup>2)</sup>。今回、解析の対象とした1993年1月～1995年12月には、太田川から流出する淡水の分布が湾北部海域において湾軸に対して垂直に拡がる場合が20/36と確率的に多かったので(第六管区海上保安本部<sup>5)</sup>)、広島湾北部海域を太田川の流軸延長線(湾軸)に直交するように2つの海域に分け、奥部をBox1、湾口

\* 1999年3月1日受領, 1999年5月11日受理

\*\* 広島大学生物生産学部

† 中国工業技術研究所

連絡先：山本民次, 広島大学生物生産学部

〒739-8528 東広島市鏡山1-4-4

E-mail: tamyama@ipc.hiroshima-u.ac.jp

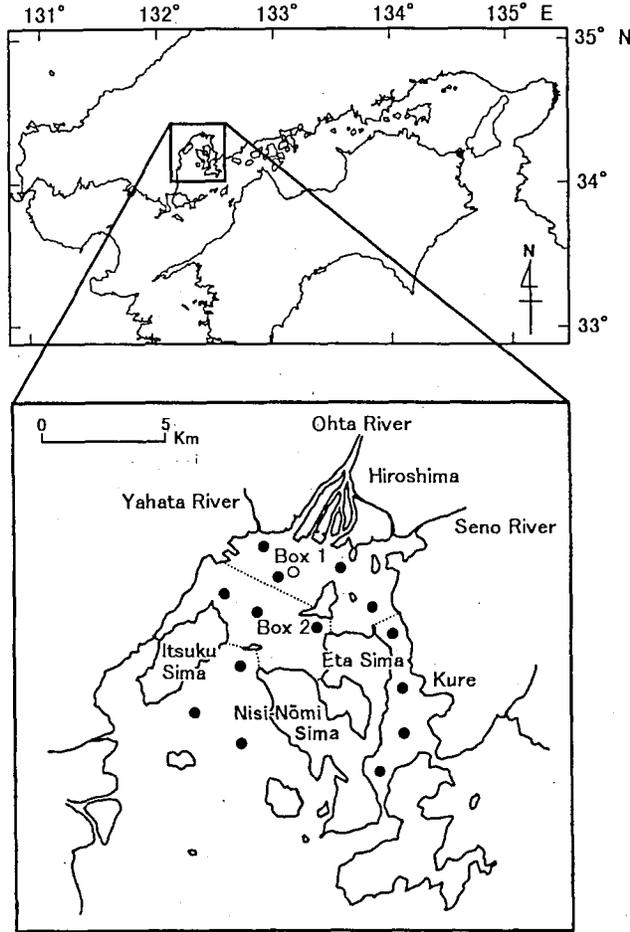


Fig. 1 Map showing the location of Hiroshima Bay in the Seto Inland Sea, Japan. Enlarged map shows the location of inflowing rivers and the arrangement of boxes in the northern Hiroshima Bay along with stations where current velocity was measured (white circle) and temperature and salinity were measured (black circle).

側を Box2 とした (Fig. 1). また、広島湾北部海域は大阪湾奥部と並んで河川水の流出による塩分成層が発達し、しばしば冬季でも成層が見られることが知られている (日本海洋学会, 1985<sup>1)</sup>; 橋本ほか, 1994<sup>2)</sup>). 1994 年は異常な渇水年であったため、塩分成層はほとんど見られなかったが、通常、密度成層が約 5 m 付近に形成されるので (Fig. 2), 海域を通年にわたり 5 m 水深を境に上層と下層に分割して、Box1U, Box1L, Box2U, Box2L とした (Fig. 3). ここで、Box1-Box2 間の断面を断面 A, Box1-呉湾間の断面を断面 B, Box2-南部 (中央部) 海域間の断面を断面 C とした。また、西能美島と江田島に囲まれた江田内湾は湾口部の断面積が極めて小さいことから、閉じているものとして扱った。以上、設定したボッ

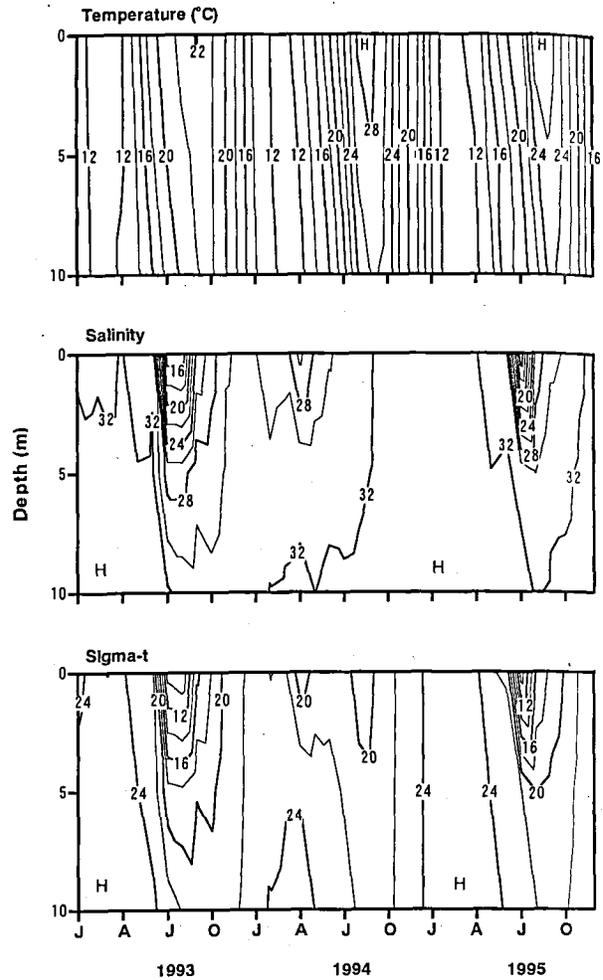


Fig. 2 Seasonal variations in average temperature, salinity and sigma-t in the northern area of Hiroshima Bay from January, 1993 to December, 1995. Abbreviations J, A, J and O denote January, April, July and October. Temperature and salinity data were cited from Sixth Regional Maritime Safety Headquarter (1993-1995).

クスの諸元を Table 1 に示す。

これらボックス間の海水交換が移流と拡散で起こるものとし、広島湾南部と呉湾を境界条件として、Box1U, Box2U と Box1L, Box2L における塩分の変化を以下の式で表した。ここで、移流は河川水流入、降雨、蒸発によって単に Box1U から Box2U へ流下するものとし、呉湾側には流れないものとした。また、鉛直循環をとまなうエスチュアリー循環とを区別した。

$$V_{1U}(dS_{1U}/dt) = A_{12U}K_{h12U}(S_{2U}-S_{1U})/x_{12} + A_{1KU}K_{h1KU}(S_K-S_{1U})/x_{1K} + A_{V1}K_{V1}(S_{1L}-S_{1U})/z_1 - (Q_R + PA_{V1} - EA_{V1})S_{1U} - \overline{U}_{12U}A_{12U}S_{1U} + \overline{U}_V A_{V1}S_{1L} \quad (1.1)$$

$$V_{2U}(dS_{2U}/dt) = A_{2CU}K_{h2CU}(S_C-S_{2U})/x_{2C} - A_{12U}K_{h12U}(S_{2U}-S_{1U})/x_{12} + A_{V2}K_{V2}(S_{2L}-S_{2U})/z_2 - (PA_{V2}$$

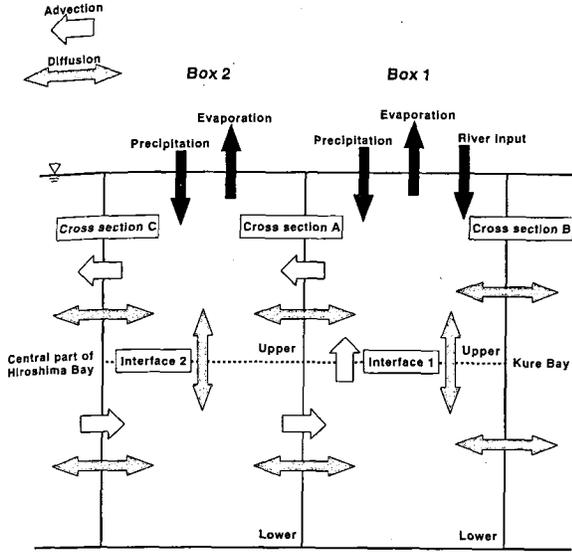


Fig. 3 Schematic diagram of box model showing salt budget in the northern part of Hiroshima Bay.

$$-EA_{V2}S_{2U} - \overline{U_{2CU}}A_{2CU}S_{2U} + \overline{U_{12U}}A_{12U}S_{1U} \quad (1.2)$$

$$V_{1L}(dS_{1L}/dt) = A_{12L}K_{h12L}(S_{2L} - S_{1L})/X_{12} + A_{1KL}K_{h1KL}(S_K - S_{1L})/X_{1K} - A_{V1}K_{V1}(S_{1L} - S_{1U})/Z_1 + \overline{U_{12L}}A_{12L}S_{2L} - \overline{U_V}A_{V1}S_{1L} \quad (1.3)$$

$$V_{2L}(dS_{2L}/dt) = A_{2CL}K_{h2CL}(S_C - S_{2L})/X_{2C} - A_{12L}K_{h12L}(S_{2L} - S_{1L})/X_{12} - A_{V2}K_{V2}(S_{2L} - S_{2U})/Z_2 + \overline{U_{2CL}}A_{2CL}S_C - \overline{U_{12L}}A_{12L}S_{2L} \quad (1.4)$$

ここで、 $V_{1U}$ ,  $V_{2U}$ ,  $V_{1L}$ ,  $V_{2L}$ : Box1U, Box2U, Box1L, Box2L の体積 ( $m^3$ ),

$A_{12U}$ ,  $A_{12L}$ ,  $A_{1KU}$ ,  $A_{1KL}$ ,  $A_{2CU}$ ,  $A_{2CL}$ : Box1U-Box2U間, Box1L-Box2L間, Box1U-呉湾間, Box1L-呉湾間, Box2U-広島湾南部間, Box2L-広島湾南部間の断面積 ( $m^2$ ),  
 $A_{V1}$ ,  $A_{V2}$ : Box1U-Box1L間の断面積 (Box1の表面積), Box2U-Box2L間の断面積 (Box1の表面積) ( $m^2$ ),

$S_{1U}$ ,  $S_{2U}$ ,  $S_{1L}$ ,  $S_{2L}$ ,  $S_C$ ,  $S_K$ : Box1U, Box2U, Box1L, Box2L, 広島湾南部, 呉湾における初期塩分,

$K_{h12U}$ ,  $K_{h12L}$ ,  $K_{h2CU}$ ,  $K_{h2CL}$ ,  $K_{h1KU}$ ,  $K_{h1KL}$ ,  $K_{V1}$ ,  $K_{V2}$ : Box1U-Box2U間, Box1L-Box2L間, Box2U-広島湾南部間, Box2L-広島湾南部間, Box1U-呉湾間, Box1L-呉湾間の水平拡散係数 ( $m^2 sec^{-1}$ ), および Box1U-Box1L間, Box2U-Box2L間の鉛直拡散係数 ( $m^2 sec^{-1}$ ),

$X_{12}$ ,  $X_{2C}$ ,  $X_{1K}$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ : Box1-Box2間, Box2-広島湾南部間, Box1-呉湾間の水平距離

Table 1 Dimensions of the boxes applied for the northern area of Hiroshima Bay.

	Surface area (km <sup>2</sup> )	Interface area (km <sup>2</sup> )	Volume ( $\times 10^8 m^3$ )	Total volume ( $\times 10^8 m^3$ )	Depth (m)	Average depth (m)
Box 1 (upper)	72.4		3.6	9.3	5.0	12.9
(lower)		72.4	5.7		7.9	
Box 2 (upper)	68.8		3.4	12.7	5.0	18.5
(lower)		68.8	9.3		13.5	

	Area of cross section ( $\times 10^3 m^2$ )	Total area ( $\times 10^3 m^2$ )	Distance of the neighboring boxes ( $\times 10^3 m$ )
Cross section A (Box 1-2)(upper)	44.1	142.1	6
(lower)	98.0		
Cross section B (Box 1-K)(upper)	10.6	47.91	14
(lower)	37.3		
Cross section C (Box 2-H)(upper)	12.5	86.00	9
(lower)	73.5		

(m), および Box1U-Box1L間, Box2U-Box2L間の鉛直距離 (m),

$Q_R$ : 河川流入量 ( $m^3 sec^{-1}$ ),

$P$ : 降水量 ( $m sec^{-1}$ ),

$E$ : 蒸発量 ( $m sec^{-1}$ ),

$\overline{U_{12U}}$ ,  $\overline{U_{12L}}$ ,  $\overline{U_{2CU}}$ ,  $\overline{U_{2CL}}$ ,  $\overline{U_V}$ : Box1U-Box2U間, Box1L-Box2L間, Box2U-広島湾南部間, Box2L-広島湾南部間, Box1U-Box1L間の断面における dt 時間内の平均流速 ( $m sec^{-1}$ ),

である。式(1.1)から(1.4)において、水平拡散係数を  $1.0 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^3 m^2 sec^{-1}$  で、鉛直拡散係数を  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6} m^2 sec^{-1}$  の範囲で変化させ、タイムステップを600秒として1ヶ月後の塩分を計算し、実測値との差が最も小さくなるようにすべての水平・鉛直拡散係数を決定した。解析は1993年1月~1995年12月の3年間について行った。解析期間中の特徴として、1993年の夏は例年になく大量の降雨があり、一方、1994年の夏は渇水である(気象庁, 1994, 1995)<sup>6,7)</sup>。

海域の塩分は海洋概報(第六管区海上保安本部, 1993-1995)<sup>8-10)</sup>の毎月の調査結果を用いた。各ボックスの平均塩分は、そのボックス内にある全観測点について鉛直方向の加重平均値を求め、それらの算術平均とした。太田川による淡水供給量は、流量年表(日本河川協会, 1995-1997)<sup>11-13)</sup>にある矢口第一流量観測所(河口から14.6 km上流; Fig. 1)の月平均流量に、それより下流域の流域面積を考慮して1.11を乗じたもの(山本ほか, 1996)<sup>11)</sup>とした。流量年表に記載されていない瀬野川, 八幡川については、太田川の流域面積と各河川の流域面積の比を

Table 2 Dimensions of the watershed area of rivers flowing into the northern area of Hiroshima Bay. Proportions of the watershed areas of the Seno River and Yahata River to the Ohta River were also shown.

	Area (km <sup>2</sup> )	Proportion
Ohta River	1690.0	1.000
Seno River	122.2	0.072
Yahata River	83.0	0.049

求め、それらに太田川の流量を乗じて算出した (Table 2). 降雨量は、気象庁年報 (気象庁, 1994-1996<sup>6,7,12</sup>) に記載されている広島市の月別平均降雨量を用いた. 各月の単位面積あたり平均蒸発量 (E) は杜多ほか (1990)<sup>13</sup>) と水理公式集 (土木学会, 1985<sup>14</sup>) をもとに次式から計算した.

$$E = 130(E_w - E_a)W \quad (2)$$

ここで、W：広島市における月平均風速 (m sec<sup>-1</sup>),

E<sub>w</sub>：海面水温に対する飽和蒸気圧 (mb),

E<sub>a</sub>：大気の水蒸気圧 (mb) (広島市における月平均気温に対する飽和水蒸気圧に月平均湿度を乗じたもの)

である. 月平均風速, 月平均気温および月平均湿度は気象庁年報 (気象庁, 1994-1996)<sup>6,7,12</sup>) から, 海面水温は海洋概報 (第六管区海上保安本部, 1993-1995)<sup>5</sup>) からそれぞれ引用した.

ボックス下層の流況を把握する目的で, 太田川河口沖約 3 km (Box 1 と 2 の境界線の少し北) の海底に流速計 (アレック電子社製, シアー流速計 ACM16M-4CH3, Yasuda *et al.*, 1997)<sup>15</sup>) を設置し, 1996年 9 月 6 日~10 月 6 日の約 1 ヶ月間にわたって流速を測定した (上嶋ほか, 1996<sup>16</sup>). 最上部 (海底上 2 m) の流速計の結果から日平均流速を算出し, その北方成分 (U<sub>12L</sub>) を河川流量 (Q<sub>R</sub>) と比較したところ, Fig. 4 の黒丸のような分布が得られた. ここで用いた恒流の日平均流速の南北成分には潮汐残差流などが含まれているが, 河口に近い観測点の位置から判断して今回の実測に基づく日平均流速の南北成分のほとんどは密度流によって引き起こされたものであると考えた.

そこで, Fig. 4 にプロットされた河川流量 (Q<sub>R</sub>) と南北成分 (U<sub>12L</sub>) との関係を表す式 (4) で近似し, これを密度流に基づく「エスチュアリー循環」によるものとみなした.

$$U_{12L} = 4.85 \log_{10}(Q_R) - 7.79 \quad (3)$$

ここで, U<sub>12L</sub>：移流流速 (cm sec<sup>-1</sup>),

Q<sub>R</sub>：河川からの流入量 (m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>),

である.

式 (4) は必ずしも根拠のある関数ではなく, 今後, 理論

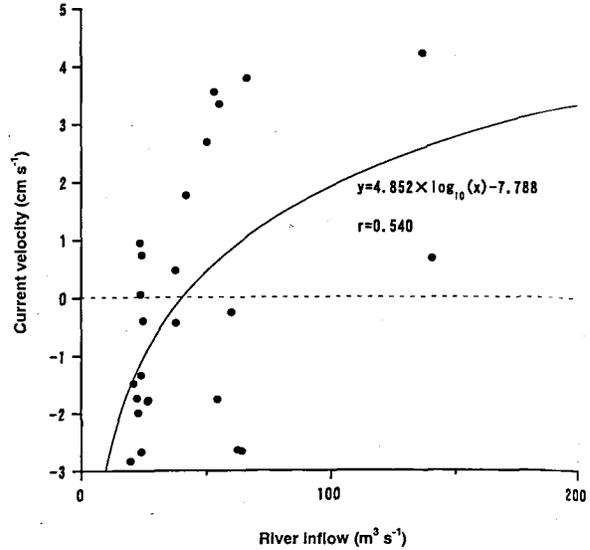


Fig. 4 Relationship between riverine volume inflow and current velocity measured at 2 m above the bottom at a fixed station shown in Fig. 1. The current velocity was the north component of daily mean velocity during September 6 to October 6, 1996 (Data were cited from Ueshima *et al.*, 1997). Corresponding daily riverine volume inflow were cited from Japan River Association (1995-1997).

的な検討を要するが, 以下の 2 点の類推はそれほど間違っていないであろう. (i) まず, 河川水の流入に対するエスチュアリー循環の応答が線形ではなく非線形であること. つまり, 河川水流入量が多くなっても, 取り込まれる海水量が比例して多くはならず, 頭打ちになることが想像される. 広島湾北部海域ではナサビ瀬戸によって南部海域との海水交換が制限されているため (Fig. 1), 河川水流入量が多くなると, 鉛直循環のみでなく水平的な循環が卓越するようになることが想像されるからである. もしまっすぐな水路のような形状の湾では, エスチュアリー循環の頭打ちレベルはより高いところになることが予想される. したがって, エスチュアリー循環の特性は湾の形状にも関係していると言える. (ii) 次に, ある閾値をもつ関数であること. つまり, 河川流量がある程度以下の場合には上層水の沖合いへの流出にともなう下層水の連行が起こらず, エスチュアリー循環は引き起こされないということを意味している. 式 (3) より, 河川からの淡水流入量が 40 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup> 以下の場合には, 下層では湾奥から湾口部へ向かう流れとなるので, エスチュアリー循環による移流はないものとした.

広島湾潮流図 (海上保安庁, 1968)<sup>17</sup>) として報告されている北部海域における潮流の流向・流速を見ると湾軸方向 (ほぼ南北方向) に全体が流動していることから, 今回の観測点での測定は北部海域の流動を代表するものと

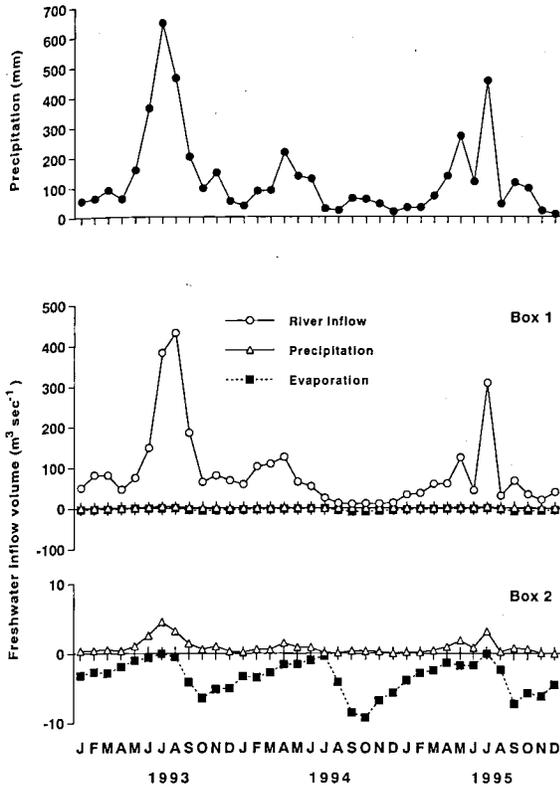


Fig.5 Monthly variations in precipitation at Hiroshima Weather Station, and in river inflow, precipitation and evaporation from 1993 to 1995 at Box1 and Box2.

考え、Box1LとBox2Lの境界面の断面積 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ を単純にかけ合わせて、連行加入による移流量( $Q_{EC}, \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ )とした。

$$Q_{EC} = \overline{U}_{12L} \times 9.8 \times 10^4 \quad (4)$$

またBox1U-Box2U間およびBox1U-Box1L間の各断面におけるエスチュアリー循環に伴う流速( $\overline{U}_{12U}, \overline{U}_V$ )は次式により求めた。

$$\overline{U}_{12U} = Q_{EC} / A_{12U} \quad (5)$$

$$\overline{U}_V = Q_{EC} / A_{V1} \quad (6)$$

先に述べたように、広島湾北部海域は河川水流入量が多いため、冬季においても弱い塩分成層が形成されることがあることから、連行加入の効果は四季にわたって適用した。

### 3. 結果と考察

1993年1月～1995年12月の広島における月間降水量、および各海域に対する河川水流入量、降雨と蒸発量の変化をFig.5に示す。1993年の夏は例年になく大量の降雨があり、一方、1994年の夏は渇水であったことが(気象庁, 1994, 1995)<sup>6,7)</sup>、河川水流入量の変動にも反映していることが分かる。降雨量と河川水流入量ともに梅雨期に最大値を示し、冬季に最低値を示す傾向がみられ、蒸発

Table 3 Volume of riverine inflow (River) and the estimated volume entrained by the estuarine circulation (Entrainment), and the ratio of them (Entrainment/River). Estimated horizontal velocity due to advection and the upwelling velocity in Box 1 were also shown.

	River	Entrainment	Ratio	Horizontal velocity		Upwelling velocity	
				A(Box 1-2)	C(Box 2-H)	Upper	Lower
	( $\times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ )	( $\times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ )		( $\times 10^{-2} \text{ m sec}^{-1}$ )			
Jan., 1993	4.4	31	7.0	0.8	0.4	2.8	0.5
Feb.	7.0	94	13.0	2.5	1.1	8.7	1.5
Mar.	7.0	93	13.0	2.4	1.1	8.6	1.5
Apr.	4.0	17	4.3	0.5	0.2	1.6	0.3
May	6.4	82	13.0	2.2	1.0	7.6	1.3
June	12.7	170	13.0	4.6	2.1	16.1	2.7
July	32.9	300	9.1	7.9	3.5	27.8	4.7
Aug.	37.2	320	8.6	8.3	3.7	29.3	5.0
Sept.	16.0	200	13.0	5.3	2.4	18.9	3.2
Oct.	5.6	63	11.0	1.7	0.7	5.8	1.0
Nov.	7.0	93	13.0	2.4	1.1	8.6	1.5
Dec.	5.9	70	12.0	1.8	0.8	6.5	1.1
Jan., 1994	5.1	50	9.9	1.3	0.6	4.6	0.8
Feb.	8.8	120	14.0	3.3	1.5	11.5	2.0
Mar.	9.4	130	14.0	3.5	1.6	12.3	2.1
Apr.	10.8	150	14.0	4.0	1.8	14.0	2.4
May	5.6	63	11.0	1.6	0.7	5.8	1.0
June.	4.6	37	8.1	1.0	0.4	3.4	0.6
July.	2.2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Aug.	1.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sept.	0.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oct.	1.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Nov.	0.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dec.	1.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jan., 1995	2.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Feb.	3.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mar.	5.1	51	10.0	1.3	0.6	4.7	0.8
Apr.	5.2	54	10.0	1.4	0.6	5.0	0.8
May	10.7	150	14.0	3.9	1.8	13.9	2.4
June	3.8	10	2.7	0.3	0.1	1.0	0.2
July	26.5	270	10.2	7.1	3.2	25.1	4.3
Aug.	2.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sept.	5.8	68	12.0	1.8	0.8	6.3	1.1
Oct.	3.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Nov.	1.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dec.	3.4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Average	7.5	75	7.2	2.0	0.9	6.9	1.2

量は秋に最も大きかった。解析期間中の河川水流入量は $0.88 \sim 37 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ で変動し、平均 $7.5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$  ( $87 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ )であった。また、北部海域に流入する淡水の98%は河川水であり、そのうちの約90%が太田川からの供給によるものであった。

河川水流入量およびエスチュアリー循環による移流量

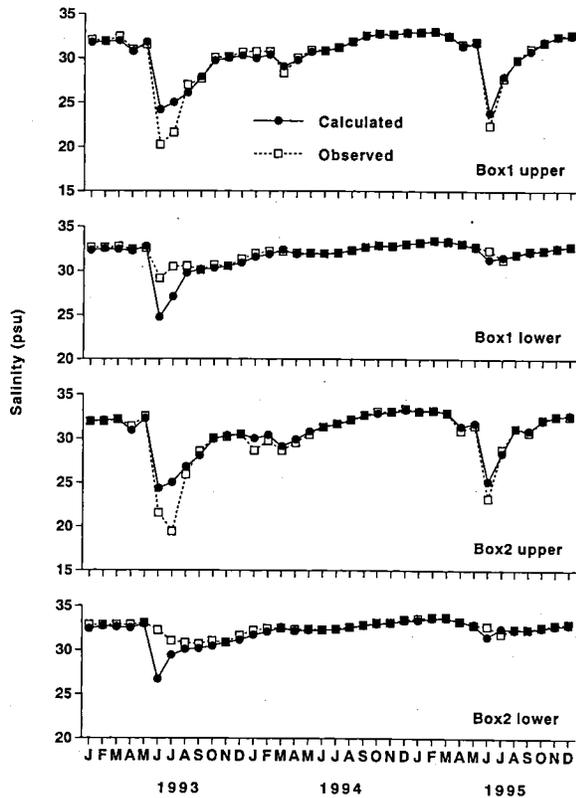


Fig. 6 Comparison between measured and calculated salinity values in two layers of each box from 1993 to 1995.

と、水平方向の移流流速 ( $U_h$ ) および Box 1 で生じる湧昇流の速度 ( $U_v$ ) を Table 3 に示す。エスチュアリー循環による移流流速は Box 1U - Box 2U 間で  $0 \sim 8.3 \times 10^{-2} \text{ m sec}^{-1}$ , Box 1L - Box 2L 間で  $0 \sim 3.7 \times 10^{-2} \text{ m sec}^{-1}$  であり、奥部での湧昇速度は  $0 \sim 0.51 \times 10^{-4} \text{ m sec}^{-1}$  ( $0 \sim 4.4 \text{ m day}^{-1}$ ) と見積もられた。また、移流流量は  $0 \sim 320 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$  と計算され、河川水流入量に対して平均で 7 倍、最大で 14 倍であった。藤原ほか (1996)<sup>18)</sup> は伊勢湾におけるエスチュアリー循環にともなう表層の移流流速を  $1.6 \sim 4.6 \times 10^{-2} \text{ m sec}^{-1}$ , 湧昇速度を  $0.4 \sim 1.5 \text{ m day}^{-1}$  と計算している。また、河川流入量に対する移流量を 2.5~30 倍と計算している。今回の広島湾における我々の計算結果は、これら伊勢湾について求められた値に近いものである。ただし、伊勢湾では淡水流入によるエスチュアリー循環よりも、冬季の季節風にともなう鉛直循環が大きく寄与している点で今回の結果とは様相が異なる。今回の計算では風による影響は鉛直拡散係数を大きくしたが(後述)、吹送流や潮汐残流による影響などは Fig. 4 のデータポイントのばらつきに反映しているものと思われる。

広島湾北部海域 (Box1 + Box2) における淡水の滞留時間 ( $T_R$ ) を

Table 4 Estimated horizontal diffusion coefficient ( $K_h$ ), and vertical diffusion coefficient ( $K_z$ ).

	$K_h (\times 10^2 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1})$				$K_z (\times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1})$			
	A(Box 1-2)		B (Box 1-K)		C(Box 2-H)		Box1	Box2
	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower		
Jan., 1993	10	10	10	10	10	10	3.0	2.0
Feb.	10	10	10	10	10	10	4.0	1.0
Mar.	10	10	10	10	10	10	7.0	3.0
Apr.	7.0	3.0	3.0	3.0	1.0	3.0	1.0	0.5
May	5.0	5.0	6.0	6.0	8.0	8.0	2.0	3.0
June	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	10	0.1
July	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	5.0	0.1
Aug.	10	10	10	10	10	10	0.5	3.5
Sept.	10	10	10	10	10	10	1.0	0.1
Oct.	10	10	10	10	10	10	3.0	4.0
Nov.	6.0	5.0	2.0	2.0	0.4	0.4	6.0	5.0
Dec.	10	5.0	10	10	10	10	3.0	2.0
Jan., 1994	10	10	10	10	1.0	10	1.0	0.1
Feb.	10	10	10	10	1.0	10	2.0	0.1
Mar.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Apr.	7.0	3.0	3.0	3.0	1.0	3.0	1.0	0.5
May	10	3.0	6.0	6.0	4.0	7.0	1.5	0.1
June	4.0	2.0	4.0	2.0	5.0	4.0	1.2	1.2
July	2.0	1.5	2.0	2.0	3.0	4.0	1.0	1.0
Aug.	2.5	2.0	3.0	3.5	8.0	8.0	1.2	1.2
Sept.	4.0	4.0	4.0	4.0	10	10	3.0	10
Oct.	5.0	5.0	5.0	5.0	10	10	6.0	10
Nov.	1.5	1.5	1.5	1.5	7.0	7.0	6.0	10
Dec.	2.0	2.0	2.0	2.0	10	10	6.0	10
Jan., 1995	7.0	7.0	7.0	7.0	5.0	10	5.0	4.0
Feb.	9.0	6.0	8.0	8.0	7.0	10	3.0	3.0
Mar.	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	8.0	2.3	1.8
Apr.	5.0	5.0	1.0	5.0	0.1	5.0	1.5	0.1
May	10	7.0	8.0	7.0	4.0	7.0	5.0	0.1
June	1.0	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
July	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	0.7
Aug.	1.0	1.5	1.5	5.0	1.5	7.0	0.5	1.5
Sept.	10	8.0	10	8.0	5.0	8.0	1.5	1.0
Oct.	6.0	6.0	6.0	6.0	8.0	8.5	3.0	3.0
Nov.	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	8.0	6.0	4.0
Dec.	10	10	10	10	10	10	8.0	4.0

$$T_R = (V_{1U} + V_{2U} + V_{1L} + V_{2L}) / (Q_R + PA_{V1} - EA_{V1} + PA_{V2} - EA_{V2} + Q_{EC}), \quad (7)$$

として算出したところ、解析期間中の広島湾北部海域における淡水の平均滞留時間は約 27 日となり、木村 (1975)<sup>19)</sup> の示した値 (平均約 29 日) とよく一致した。広島湾北部海域の容積  $22 \times 10^8 \text{ m}^3$  (Table 1) に対して平均河川水流入量は  $7.5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$  であるので (Table 3), 前者を後者で割ると河川水のみ滞留時間は約 290 日という大きな値が得られる。一方、広島湾北部海域の容積をエスチュアリー循環による南部海域からの流入海水量  $7.5 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$  (Table 3) で割ると 29 日となる。河

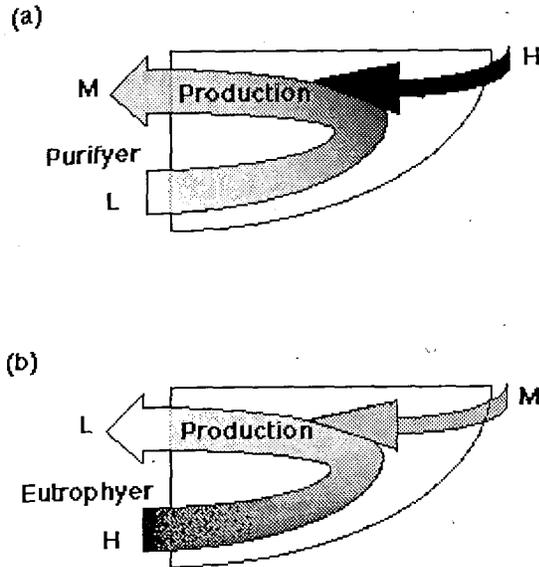


Fig. 7 Schematic diagram showing a characteristic feature of estuarine circulation; (a) in case of high nutrient concentration in the river water and low concentration in the lower layer water out of the bay (purifier), and (b) the reverse case (eutrophier). H, L and M denote the level of nutrient concentrations, high, low and medium, respectively.

川水流入量に比べて、式(8)の分母中の降雨( $PA_{V1}$ ,  $PA_{V2}$ )や蒸発( $EA_{V1}$ ,  $EA_{V2}$ )の項はさらに小さく無視できるほどであるので、広島湾北部海域の海水交換に果たすエスチュアリー循環の働きが大きいことが理解できる。

塩分収支解析から得られた解析期間中の水平拡散係数( $K_h$ )、鉛直拡散係数( $K_v$ )をTable 4に示す。1993年6、7月を除き、塩分の計算値を実測値によく一致させることができた(Fig. 6)。水平拡散係数は $0.1 \sim 10 \times 10^2 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ 程度であった。一方、鉛直拡散係数は冬季に大きく、夏季に小さい傾向がみられ、 $0.1 \sim 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ であった。これらのことから、成層の夏季における発達と冬季の崩壊(Fig. 2)が拡散係数の季節変動に良く現れていることが分かる。

#### 4. おわりに

広島湾北部海域ではおもに太田川によって引き起こされるエスチュアリー循環により、河川流入量の平均7倍、最大14倍の海水が南部海域から下層に流入していることが分かった。つまり、北部海域の海水交換の多くがエスチュアリー循環によって行われていると言える。ここで、広島湾北部海域の生物生産環境に関して、次のような機構が想定される(Fig. 7)。(河川水中の栄養塩濃度) > (南部海域底層の栄養塩濃度) の場合には、エスチュアリー

循環は北部海域の浄化として作用する(Fig. 7a)。一方、(河川水中の栄養塩濃度)  $\leq$  (南部海域底層の栄養塩濃度) の場合には、北部海域の生産性向上を促すことになる(Fig. 7b)。このように、エスチュアリー循環は河川-海域間の物質濃度傾斜の大きさの違いにより、浄化と生産性向上(富栄養化)という両面の作用を発現することになり、当該海域における生物生産の恒常性維持に役立っていると考えられる。

窒素やリンなど親生物元素の海域内での収支に果たすエスチュアリー循環の役割についての定量的な解析については今後の検討課題であるが、例えばダム建設などによる河川水量および水質の変化は、エスチュアリー循環過程の変化を介して内湾生態系に大きな変化を与えるはずである。このことから、河川水量と水質をコントロールすることで、生物の生息環境と生産性を制御できる可能性もある。

#### 謝辞

英文要旨を手直しいただいた、広島大学生物生産学部教授 Narasimmalu Rajendran 博士に感謝いたします。本研究は広島県水産試験場受託研究「広島湾の持続的カキ養殖における浄化能力の評価」の一部として行われたものである。

#### 参考文献

- 1) 日本海洋学会 (1985): 日本全国沿岸海洋誌. 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 (編), 1106 pp.
- 2) 橋本俊也・松田 治・山本民次・米井好美 (1994): 広島湾の海況特性—1989~1993年の変動と平均像—. 広島大学生物生産学部紀要, 33, 9-19.
- 3) Rattray, M. and D. V. Hansen (1962): A similarity solution for circulation in an estuary. *J. Mar. Res.*, 20, 121-133.
- 4) 藤原建紀 (1997): 淡水影響域におけるエスチュアリー循環流と生物・物質輸送. 海と空, 73, 23-30.
- 5) 第六管区海上保安本部 (1993-1995): 海洋概報. 16 pp.
- 6) 気象庁 (1994): 平成五年度全国気象表. p. 33-34, 気象庁年報.
- 7) 気象庁 (1995): 平成六年度全国気象表. p. 33-34, 気象庁年報.
- 8) 日本河川協会 (1995): 平成五年流量年表. 建設省河川局 (編), 431 pp.
- 9) 日本河川協会 (1996): 平成六年流量年表. 建設省河川局 (編), 431 pp.
- 10) 日本河川協会 (1997): 平成七年流量年表. 建設省河川局 (編), 431 pp.
- 11) 山本民次・北村智顕・松田 治 (1996): 瀬戸内海に対する河川流入による淡水, 全窒素および全リンの負荷. 広島大学生物生産学部紀要, 35, 81-104.
- 12) 気象庁 (1996): 平成七年度全国気象表. pp. 33-34, 気象庁年報.
- 13) 杜多 哲・杉山元彦・本城凡夫・大和田紘一・浅川明彦・田中

- 信彦・佐古 弘・北村章二・淡路雅彦・飯倉敏弘・熊田 弘・山本茂也 (1990) : 五ヶ所湾とその支湾における海水交換の季節変動. 養殖研報, 18, 13-29.
- 14) 土木学会 (1985) : 水理公式集. 土木学会 (編), 東京, 625 pp.
- 15) Yasuda, H., Y. Takasugi and T. Higo (1997) Generation of high turbidity layers in the Seto Inland Sea. J. Coastal Res., SI25, 31-40.
- 16) 上嶋英機・埜口英昭・肥後竹彦・高杉由夫・安田秀一 (1997) : 海域攪乱が内湾生物環境に与える影響評価技術に関する研究 (I). 平成8年度環境保全研究成果集(I), 46-I, 環境庁企画調整局研究技術課 (編). 16 pp.
- 17) 海上保安庁 (1968) : 広島湾潮流図, 海図第6209号.
- 18) 藤原建紀・福井真吾・杉山陽一 (1996) : 伊勢湾の成層とエスチュアリー循環の季節変動. 海の研究, 5, 235-244.
- 19) 木村知博 (1975) : 広島湾に流入する淡水の移流について. 水産増殖, 22, 110-119.