

海水交換率による大村湾の水質汚濁予測に関する研究

中 村 武 弘*・ 富 樫 宏 由**

1. ま え が き

外海と接続している内湾の海水は絶えず湾口を流出入する潮汐によって外海水と交換されている。この海水交換の機構にはいろいろの要因があり不明の点が多いが、海水交換の強さは、ある仮定のもとに求める事ができる。Parker ら¹⁾はこの海水交換の強さを潮汐交換率（一般には海水交換率とも呼ばれるが、本報文では以下単に交換率と呼ぶ。）として定義し観測によって求める方法を提案した。柏井²⁾は Parker らとは逆方向のもう一つの交換率を定義し、これらの2つの交換率を用いて湾内の水質予測が可能であることを示した。また、著者ら³⁾もこれらの2つの交換率を用いて柏井とは異なった方法により水質予測式を導き、同じ結果を得た。柏井の定義した交換率の現地観測の例はまだ見受けられないが、Parker らの定義した交換率の観測の値は Parker ら自身¹⁾の観測によるサンフランシスコ湾、松本ら⁴⁾による東京湾、藤森ら⁵⁾による伊勢湾で得られている。

Parker らの解析によると交換率は潮差に比例して大きくなり、松本らの結果も同様の傾向を示している。しかし藤森らの結果は逆に潮差の小さい時の方が交換率が大きくなっている。また、これらの観測時の潮汐は全て日潮不等のない等潮時に行なわれており、不等潮時には交換率がどの様になるかも不明である。このように交換率と潮汐との関係には不明な点が多い。

そこで本報では大村湾で4回の現地観測を行ない、いろいろな潮汐のもとでの交換率の値を求め、潮汐と交換率との関係を調べ、また更に、大村湾内の昭和50年～52年のCODの実測値と観測で得られた交換率の値を用いた予測式による計算値を比較し、検討した結果について報告する。

2. 海水交換率と水質予測式

本報文において用いる海水交換率は Parker ら¹⁾の r_E と柏井²⁾の r_F であり、各々次の様に定義される。

r_E : 上げ潮時の流入量のうち、初めて湾内に流入す

る外海水の占める割合。

r_F : 下げ潮時の流出量のうち、初めて湾外に流出する湾内水の占める割合。

いま指標となる物質を適当に選び、下げ潮時に流出する水塊の平均濃度を C_E 、上げ潮時に流入する水塊の平均濃度を C_F 、湾内水の平均濃度を C_B 、外海水の平均濃度を C_0 とすると各々

$$r_E = \frac{C_F - C_E}{C_0 - C_E} \dots\dots\dots (1)$$

$$r_F = \frac{C_F - C_E}{C_F - C_B} \dots\dots\dots (2)$$

で求められる。次に水質の予測においては、これら2つの海水交換率を用いて著者ら³⁾が導いた湾内の指標物質に関する連続の方程式を用いるが、この式は式の形は全く異なるが、すでに柏井によって提示されていたものと同一である。連続の方程式を、

$$V \frac{dC_B}{dT} = \beta Q_F C_0 - \gamma Q_E C_B + D \dots\dots\dots (3)$$

の形で表わすと $\gamma Q_E / V \ll 1$ の条件のもとで

$$\beta = \frac{r_E \left\{ 1 - \frac{1}{\alpha} (1 - r_F) \right\}}{r_E + r_F - r_E r_F} \dots\dots\dots (4)$$

$$\gamma = \frac{r_F \{ 1 - \alpha (1 - r_E) \}}{r_E + r_F - r_E r_F} \dots\dots\dots (5)$$

の関係が成り立つ。ここに V は湾水量、 T は1潮汐周期を単位とした時間、 Q_F は上げ潮時の流入水量、 Q_E は下げ潮時の流出水量、 D は陸水の流入と共に湾内に流入する指標物質の1潮汐当りの総量、 α は Q_F と Q_E の比 (Q_F / Q_E) である。 β を外海水の内側への交換率、 γ を湾内水の外側への交換率と呼ぶ事とする。いま外海水の濃度 C_0 および陸水からの流入量 D を一定と仮定すると式(3)の解は

$$C_B = \left\{ C_B^1 - \frac{1}{\gamma Q_E} (\beta Q_F C_0 + D) \right\} \cdot \exp \left(- \frac{\gamma Q_E}{V} T \right) + \frac{1}{\gamma Q_E} (\beta Q_F C_0 + D) \dots\dots\dots (6)$$

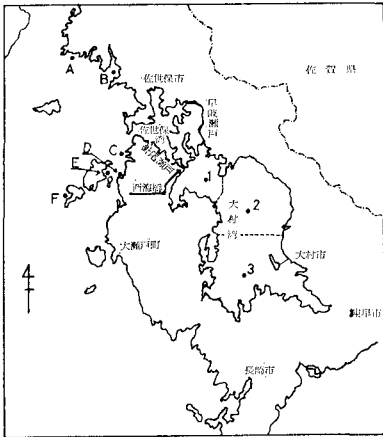
となる。ここに C_B^1 は初期濃度である。

* 正会員 長崎大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 長崎大学教授 工学部土木工学科

3. 観 測

海水交換率 r_E, r_F の現地観測による測定例が少ない理由の一つは、式 (1), (2) 中の諸量を求めるためには、湾内および湾外の濃度の観測と湾口での流量および濃度の連続観測を同時に行わなければならない、非常に大規模な観測とならざるを得ないためと思われる。幸いにも大村湾周辺地域には長崎県環境部の水質測定点が多数あり、湾内では月に 1 度、湾外では 2 ヶ月に 1 度の測定が行なわれている。そこで著者らは環境部の測定日に合わせて湾口で濃度の現地観測を行い、環境部からデータを頂いて湾内および湾外濃度の決定に使用し、流量は潮位表より計算により求める事とした。大村湾は長崎県の中央部に位置し、湾北部の針尾瀬戸と早岐瀬戸の 2 つの細長い水道で佐世保湾と連なり、その佐世保湾を通じて外海と接続する非常に閉塞的な内湾である (図—1)。針尾瀬戸の西海橋付近での横断面は幅約 200 m、水深約 40 m である。それに比し、早岐瀬戸の観潮橋附近での横断面は幅約 30 m、水深約 3 m と非常に小さく、また水道の長さも非常に長い。したがって海水交流はそのほとんどが針尾瀬戸を通じて行われていると考えられる。観測は 1979 年 12 月から 1980 年 1 月にかけて 4 回行った。各 1 回の観測で r_E, r_F 、各々 2 つの値を得る様に 2 周期半の連続観測を予定していたが、この時期は例年になく雨の日が多く、第 1 回目を除いた残りの 3 回は雨のため観測を途中で中断せざるを得なかった。観測期間中の大村湾周辺 5 地点 (佐世保、大瀬戸、大村、諫早、

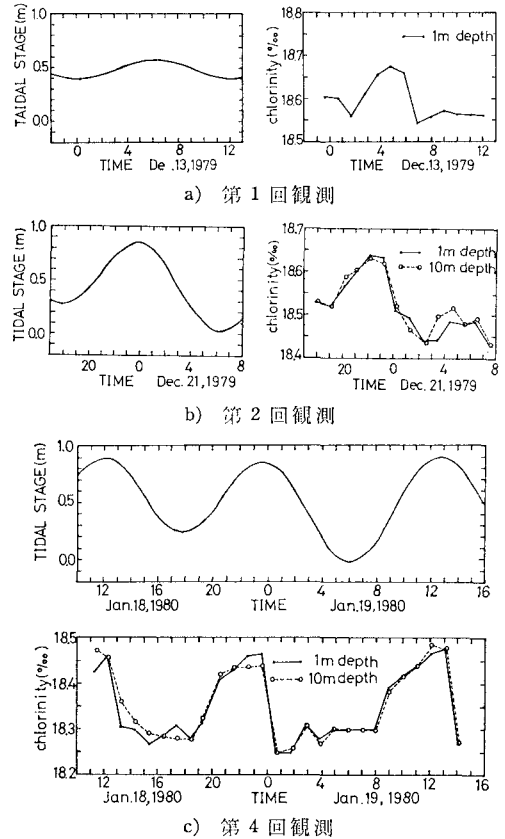


図—1 大村湾周辺地域

長崎) の平均雨量を観測月日と共に表—1 に示す。採水地点は西海橋の中央下の 1 地点であり、採水時間間隔を 1 時間 2 分とし、水面下 1 m 以内と水深約 10 m の 2 水深で採水を試みた。採水は約 4 kg の重りを付けゴム栓をしたポリエチレン製の採水ビンを橋上よりロープで吊り下げて海水中に下し、ゴム栓を引き抜いて行った。しかし、10 m 層の採水においては転流時前後の流速の遅い時には 10 m 辺りまで採水ビンを下す事ができたが、流速の速い時には採水ビンが流されて浮き上がり、どの水深の海水を採水したかは不明である。海水中の指標物質は塩素量とし、採水した海水を研究室に持ち帰り、サリノメーターで濃度を測定した。

4. 観測結果と海水交換率の算定

塩素量の観測値を潮位表より計算した潮位曲線と共に図—2 に示す。第 3 回観測のデータは欠測である。図中



図—2 潮位と塩素量

表—1 観測日と雨量 (雨量は長崎、諫早、大村、佐世保、大瀬戸での雨量の算術平均値)

年. 月. 日	1979 年 12 月 6~11	12	13	14~19	20	21	1980 年 1 月 22~	1~ 7	8	9	10~17	18	19
観 測		第 1 回			第 2 回		第 3 回			第 4 回			
雨量 (mm)	0	0	0	0	26.2	0	43.8	48.6	0	6.8	31.6	0	1.4

10 m depth の値は水深約 1~10 m の間で採水した海水の塩素量である。1つの海水交換率は1周期間の潮汐のデータから得られる。そこで潮汐に番号を付けておく。第1回観測の潮汐を No. 1, 第2回の潮汐を No. 2, 第4回観測には半周期づつ重なり合った3つの潮汐がありそれらを順に No. 41, No. 42, No. 43 とする。これらの潮汐の形態は, No. 1, No. 41, No. 43 が上げ潮時と下げ潮時の潮差がほぼ等しい等潮であって潮差がこの順に大きくなっているのに対し, No. 2, No. 42 は不等潮である。潮汐 No. 1, No. 2, No. 42 からは交換率 r_F , No. 41, No. 43 からは r_E の値が得られる。

(1) 潮汐形態の相違が濃度変動に及ぼす影響

塩素量濃度は潮汐振動に対応して変動している。各潮汐の上げ潮時の潮差 H_F , 下げ潮時の潮差 H_E およびそれらの平均値 H_M とそれぞれの潮汐に対応する濃度の最大値 C_{MAX} , 最小値 C_{MIN} , 上げ潮時の平均濃度 C_F , 下げ潮時の平均濃度 C_E の値をまとめて表-2に示す。まず潮差の相違が濃度変動に及ぼす影響を探るため潮差の平均値 H_M に対する濃度差 $(C_{MAX}-C_{MIN})$ の値をプロットし, 図-3に示す。これより点のばらつきはあるが濃度差 $(C_{MAX}-C_{MIN})$ は潮差に比例して大きくなっている事がわかる。次に同じく潮差 H_M に対して平均濃度の差 (C_F-C_E) の値をプロットし, 図-4に示す。これより濃度差 (C_F-C_E) も潮差に比例して大きくなってい

表-2

	H_F (m)	H_E (m)	H_M (m)	C_{MAX} (‰)	C_{MIN} (‰)	C_F (‰)	C_E (‰)	水 深
No. 1	0.168	0.171	0.170	18.674	18.542	18.626	18.561	1 m
No. 2	0.586	0.832	0.709	18.638	18.442	18.589	18.466	1 m
				18.630	18.435	18.592	18.480	10 m
				18.465	18.265	18.390	18.293	1 m
No. 41	0.610	0.640	0.625	18.456	18.276	18.393	18.312	10 m
				18.465	18.248	18.390	18.279	1 m
No. 42	0.610	0.869	0.740	18.439	18.248	18.393	18.278	10 m
				18.465	18.248	18.385	18.279	1 m
No. 43	0.916	0.869	0.893	18.485	18.248	18.385	18.278	10 m

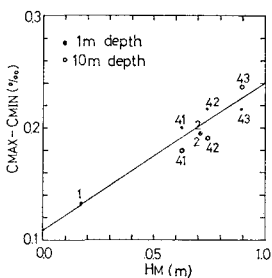


図-3 H_M と $(C_{MAX}-C_{MIN})$ の関係

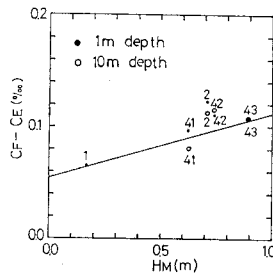


図-4 H_M と (C_F-C_E) の関係

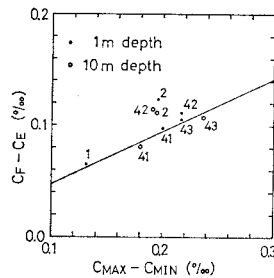


図-5 $(C_{MAX}-C_{MIN})$ と (C_F-C_E) の関係

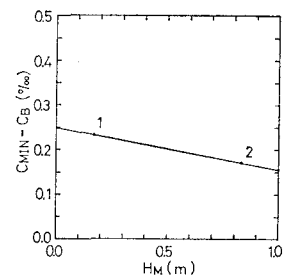


図-6 H_M と $(C_{MIN}-C_B)$ の関係

る事がわかる。さらにこの図には潮汐が等潮であるか不等潮であるかの違いも表われているようである。図中の実線は等潮の潮汐 No. 1, No. 41, No. 43 に対する回帰直線であるが, 不等潮の潮汐の値はこの直線から外れて分布していることがわかる。次に濃度差 $(C_{MAX}-C_{MIN})$ に対して平均濃度の差 (C_F-C_E) をプロットし, 図-5に示す。この図でも等潮の潮汐が略一直線上に分布し, 不等潮の潮汐の値は外れて分布している。この直線の方程式は

$$(C_F-C_E)/(C_{MAX}-C_{MIN})=0.47$$

であり, この関係が等潮の潮汐ならば潮差とは無関係に成り立っている。

(2) 湾内および湾外の濃度

海水交換率を算定する為の湾内濃度 C_B および湾外濃度 C_o は長崎県環境部から頂いた水質測定データの使用するが, C_B, C_o の値は C_E, C_F の値と同時の観測値でなければならない。しかし本観測において著者らの観測口を環境部の測定日と合わせる事が出来たのは, 第1回目の観測の C_B の値に対してだけである。そこで他の観測日における C_B と C_o の値をここで推定する。

a) 湾内濃度

大村湾内における環境部の水質測定点は 20 数地点であるが, 図-1に示す湾中央部3地点 (St. 1, 2, 3) の他は全て湾岸沿いであるため, この3点での測定値を用いる。測定値は第1回観測日と同日 (12月12日) の表層における値がある。湾内の平均濃度は $C_B=18.31‰$ であった。平均は図-1中の破線で区切られた面積の重みを付けて算出した。測定値および重みを表-3に示す。第2回観測日の湾内濃度はこの第1回観測の $C_B=18.31‰$ を用いて次の様に推定した。表-1に示した雨量データによると12月6日から第1回の観測日をはさんで12月18日までの雨量は 0 mm である。したがって, 冬期における蒸発量は少ない事を考え合わせると, 12月18日まで湾内濃度はほぼ 18.31‰ であったと考えられる。続く12月19日の 26.2 mm の降雨は第

2 回観測日の前日であるからそのほとんどは湾内に残留して湾内濃度を薄めたと考えられる。つまり集水面積を海面面積と等しくおくと $8.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ の真水が濃度 18.31‰ で容積 $4.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水に加えられたと考えられる。したがって、第 2 回観測日の湾内平均濃度は 18.27‰ と推定される。

表—3 湾内の塩素量 (長崎県環境部より頂いた資料による)

St.	No. 1	No. 2	No. 3
塩素量 (‰)	18.1	18.4	18.3
重み	0.162	0.405	0.433

次に第 4 回観測日の湾内濃度は第 1 回と第 2 回の濃度を用いて次の様に推定した。

ある潮汐に対する濃度の最小値 C_{MIN} は湾内濃度 C_B より低くなることはない。また観測結果 図—3 より濃度差 ($C_{\text{MAX}} - C_{\text{MIN}}$) は潮差に比例して大きくなることがわかっている。したがって C_{MIN} と C_B の差は潮差に比例して小さくなると考えられる。すなわち、第 1, 2 回観測日の値から下げ潮時の潮差 H_E と濃度差 ($C_{\text{MIN}} - C_B$) の関係は 図—6 に示す直線になると推定される。この直線より第 4 回観測の 2 つの下げ潮 $H_E = 0.640 \text{ m}$ と 0.869 m を用いて推定した湾内濃度はどちらも等しく 18.08‰ となる。したがって第 4 回観測日の濃度は 18.08‰ と考えられる。

b) 湾外濃度

湾外における環境部の測定地点は 図—1 に示す 6 地点 (St. A, B, C, D, E, F) である。交換率算定のためには海洋中央部での値が適当であるが、測定点が無いためここではやむをえずこれらの 6 地点の算術平均値を用い

表—4 湾外の塩素量 (長崎県環境部より頂いた資料による)

St.	A	B	C	D	E	F
塩素量 (‰)	19.0	19.5	19.5	19.3	19.4	19.5
測定年月日	12月5日	12月3日	1979年12月25日			

る。6 地点での測定値と測定日を 表—4 に示す。湾外平均濃度は 19.37‰ となった。測定は 2 ケ月に 1 度しか行われていないため全観測に対してこの値を用いる。交換率の算定に用いる各観測の湾内および湾外の濃度をまとめると 表—5 の様になる。

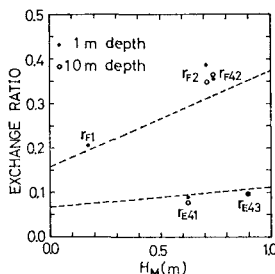
表—5 海水交換率の算定に用いる湾内および湾外の塩素量の値

観測	第 1 回	第 2 回	第 4 回
C_B (‰)	18.31	18.27	18.08
C_o (‰)	19.37		

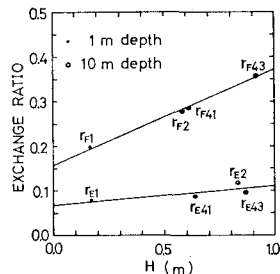
(3) 海水交換率の算定

交換率の値を潮差の平均値 H_M に対してプロットし、図—7 に示す。図中の添字の番号は対応する潮汐の番号

である。図—7 の交換率の値は観測値よりそのまま計算されたものであるから潮汐の不等による影響を含んでいると考えられる。そこで潮汐の不等の影響を取り除く事を考える。いま潮差 H の等潮の潮汐の半周期の平均濃度つまり C_E または C_F のどちらか一方だけが既知であるとする。等潮の潮汐では $H = H_M$ であるから 図—4 の直線を用いて濃度差 ($C_F - C_E$) を求める事ができる。($C_F - C_E$) は式 (1), (2) の分子の値であるから、 C_F が既知の場合は交換率 r_F を、 C_E が既知の場合は r_E を求める事ができる。言い換えれば、半周期の潮差 H と平



図—7 H_M と海水交換率の関係



図—8 潮差と海水交換率の関係

均濃度 (C_F 又は C_E) が既知であれば 図—4 の直線を用いて交換率の値を求めることができることになる。そしてその求めた交換率は潮差 H の等潮の潮汐の交換率と考えられる。この方法によって算出した交換率の値を潮差 H に対して示したのが 図—8 である。図中の添字の番号は潮汐番号である。これより等潮の潮汐の海水交換率 r_E, r_F は各々一直線上に分布し、潮差に比例して大きくなる事がわかる。しかしその直線は Parker らの様な原点を通る直線ではない。また 図—7 中の破線は 図—8 中の直線を描いたものであるが、この図から不等の潮汐 No. 2 と No. 42 の交換率 r_F の値がこの直線から外れて大きな値を示していることがわかる。しかし不等潮汐の交換率 r_F の値が常に等潮潮汐の交換率 r_F の値より大きい値を示すものかはこの観測結果だけからでは判断できない。何故なら不等潮汐には 1) $H_F > H_E$ と 2) $H_F < H_E$ の 2 つの場合があり潮汐 No. 2 と No. 42 は共に 2) の場合に属しているからである。大村湾の平均潮差 (M_2 潮差) は 48 cm であるから大村湾の平均的海水交換率の値は、図—8 より

$$r_E = 9\%, \quad r_F = 26\%$$

と算定される。また大村湾においては、 $\alpha = Q_F / Q_E \approx 1$ である。 $\alpha = 1$ の場合、各々式 (4), (5) で定義される内側および外側への交換率の値は互いに等しく、

$$\beta = \gamma = 7\%$$

と算定される。

5. 水質予測式の検討

水質予測式(6)を用いて予測を行うには負荷量, すなわち湾内に流入する1潮汐当りの総量 D が既知の指標物質がなければならない. 大村湾に対しては, 昭和50年10月に長崎県環境部によって COD 負荷量の算定が行われている. また COD 濃度の測定も同部によって昭和49年以前から継続して行われている. そこで指標濃度を COD 濃度とし, 昭和50年から52年にかけての大村湾内濃度の実測値に対し大村湾の平均的海水交換率の値を用いた予測式による計算値を比較し, 予測式の適用性をみる. まず実測値による COD 濃度の変動を 図-9 に実線で示した. 実測値は塩素量濃度と同様の湾内3点の重み付き平均値である. これよりまず COD 濃度が周期的に大きく変動していることがわかる. これは湾内の内部生産による富栄養化現象と考えられ, その周期はほぼ1年で, 夏期に高く, 冬期に低く, またその変動幅はほぼ 1.0 ppm と一定である. さらに濃度はこの大きな周期的変動とは別にゆるやかな上昇傾向を示していることがわかる. 次に予測式(6)に対しては次の諸量を用いて計算を行った.

$$C_0 = 1.21 \text{ ppm}$$

$$D = 1649 \text{ Kg/unit time}$$

$$Q_E \div Q_F = 1.6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{unit time}$$

$$V = 4.1 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$\gamma = \beta = 0.07$$

ここに, C_0 の値は湾外6地点の昭和50年度1ヶ年間の

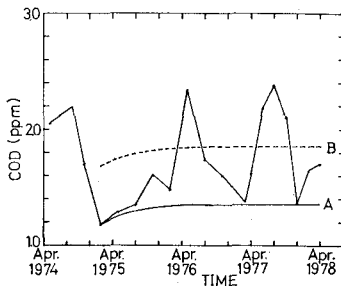


図-9 実測値と予測式(実測値は長崎県環境部より頂いた資料による)

算術平均値であり, D の値は昭和50年10月の値である. 初期値 C_0 を昭和50年2月の値にとり式(6)の計算値を描いたものが 図-9 中の実曲線 A である. 曲線 A は実測値の冬期の値を予測しており内部生産による周期的変動を除いた平均的な濃度の上昇をよく表わしていると思われる. そこで年平均の内部生産として考えられる変動幅の 1/2 (0.5 ppm) を負荷量として考慮すると予測値は破曲線 B となり, この曲線は実測値の平均的傾向をよく表わしていると思われる.

6. あとがき

大村湾の海水交換率を求めるために現地観測を行い, 以下の結果を得た. 海水交換率の値は潮差に比例して大きくなるが, Parker らのような原点を通る直線ではない. 大村湾の平均潮差に対する交換率の値は $r_E = 9\%$, $r_F = 26\%$, $\beta = \gamma = 7\%$ である. 次にこの交換率の値を用いて水質予測式の適用性を検討し良好な結果を得た.

謝辞: 本研究を行うに当たり, 全般について協力を頂いた長崎大学工学部土木工学科平山康志技官, 観測に協力を頂いた元長崎大学工学部土木工学科学生岩永幸久・藤田誠・松田寿一の諸君, 資料を提供して下さい長崎県環境部公害規制課・長崎県衛生公害研究所・長崎県水産試験場ならびに観測の便宜をはかって下さった西海橋公園管理事務所・西海橋警察官駐在所の関係各位に対し, ここに記して深く感謝の意を表します.

参考文献

- 1) Parker, D. S., D. P. Norris and A. W. Nelson: Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98 SA2, pp. 305~323, 1972.
- 2) 柏井 誠: 潮汐による海水交換率について, その1—海水交換の概念と海水交換率, 1977年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 96~97, 1977.
- 3) 中村武弘・富樫宏由: 内湾の潮汐による海水交換について, 第24回水講演文集, pp. 457~464, 1980.
- 4) 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅: 海水交流に関する現地観測, 第21回海講演文集, pp. 291~296, 1974.
- 5) 藤森研一・稲富隆昌・内田豊彦・園山哲夫: 伊勢湾水理模型実験と現地調査(第2報)—伊勢湾の海水交流について, 第23回海講演文集, pp. 518~523, 1976.