

瀬戸内海の海水交換機構

——ラグランジュ的手法による水理模型実験——

上嶋英機*・橋本英資**・山崎宗広***・宝田盛康*

1. ま え が き

海水交換機構を明らかにするため、これまでは固定された水域において流動、物質濃度の変化を調べるオイラー的手法を用いた調査及び、実験的研究が主体であった。しかし、湾内の物質がどのように移動し、交換しているかを詳細に知るためには、個々の物質粒子の動きをラグランジュ的に追跡する方法が最も分り易い。この方法によって、物質粒子自身の移動経路（位置組成）と経過時間から、湾外に出るまでの年令組成が明確にされ、対象水域での滞留時間、交換時間が求められる。しかし、実際に現地での物質粒子追跡は大変困難であり、その研究実績は少ない。このため、再現性のよい水理模型実験か、数値実験により海水粒子を追跡する方法以外にない。

本報では、瀬戸内海全域を対象とした大型水理模型を使用し、ラグランジュ的手法による実験技術の確立と再現性を図り、位置組成、年令組成から交換機構を明らかにする。更に、閉鎖的な大阪湾、広島湾と瀬戸内海中央の燧灘での長期実験より、湾内物質の残余関数を求め、滞留時間によって交換規模を定量的に評価する。他方、オイラー的な染料実験による結果とも比較検討する。

2. ラグランジュ的水理実験手法

瀬戸内海水理模型は水平縮尺 1/2 000、鉛直縮尺 1/160 の潮汐水理模型で、潮汐流の相似性は達成されている¹⁾。この水理模型内の水域に、水粒子を代表し得るターゲットとして、模型水（淡水）の比重に近く、流れとの追従性がよい5色のスーパーボール（直径6cm、比重0.92）を多数（最高5千個）使用した。実験に於ては、湾内全域での水面積比率が一定となるように、マグネット離脱装置を模型海底面に布設し、ボールを水面下のマグネットに接着する。実験潮汐として半日周潮（ M_2 潮、現地12時間25分）を与え、流れが安定した後に一斉にボールを離脱させる。水面に浮上し移動するボールの追跡

は、全てのボールに記した背番号と位置を直接読み取り、更に、自動撮影カメラによる連続撮影とスナップ撮影を行い、それらの資料からボールの移動経路と輸送分布を作成する。以上の手法により実験を実施し解析を行った。

3. 実験の再現性と精度について

ラグランジュ的手法による実験の、くり返し再現性と精度を確認するため、大阪湾をモデル海域として実験を行った。図-1（左図）に示すように、湾内全域に約 4 km² 当り 1 個の割合で約 300 個のボールをマグネットで配置し、 M_2 潮による 400 周期間の連続実験の中で、0, 100, 200, 300 周期 (pd) と、100 周期間隔で4回色分けしたボールを同条件で瞬間放流した。

放流後のボールは図-2に1例として示すように、明石海峡と友ヶ島水道を通過し、播磨灘、紀伊水道に輸送

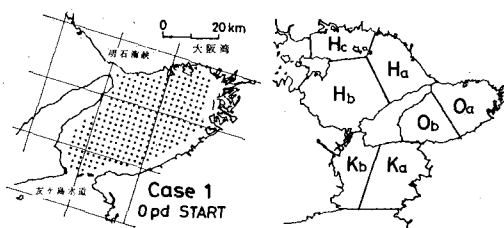


図-1 ボール初期配置（図左）と水域区分（図右）

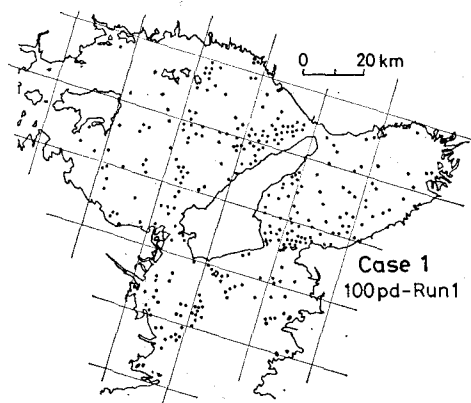


図-2 ボール輸送分布, Case-1, (Run. 1, 100 周期)

* 正会員 工修 工業技術院 中国工業技術試験所

** 正会員 工業技術院 中国工業技術試験所

*** 工業技術院 中国工業技術試験所

されていく。4回(Run. 1~4)での湾内ボール残留量と他水域への輸送分布の経時変化は、大局的によく一致していた。これらの水域を図-1右図のように、7水域に区分し、各水域に輸送されるボール個数と位置を一定間隔で観測した。

そこで、各実験ケースでの再現性を、相関係数(再現係数)から検討した。即ち、再現係数 r は、一般的に共分散と標準偏差から(1)式により求められる。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式に於て、 x, y は、4ケース(Run. 1~4)の組合せによるもので、 i は7水域への分配量を基に50周期毎に再現係数を算出した。

表-1 再現係数 r の算出結果

Run	50pd	100pd	150pd	200pd	250pd	300pd
1-2	0.94	0.88	0.91	0.84	0.96	0.96
1-3	0.94	0.67	0.53	0.73		
1-4	0.98	0.89				
2-3	0.96	0.66	0.77	0.97		
2-4	0.96	0.90				
3-4	0.96	0.89				

表-1は、各ケースに対する再現係数の算出結果である。これより、最も長期間追跡したRun. 1と2では300周期まで高い相関が見られるが、実際には150周期以降、各水域内にボールがトラップされ、全体的な変動量は少ない。このため、ボール1個の変動が大きな重みとなるため、再現係数に影響を与える場合がある。従って、実験精度としては、150周期を目安として考えれば高い再現性が得られることが確認できた。然し、対象水域の交換性により、再現性を確保できる実験時間は異なるであろうが、必要以上の長期実験では変動量鈍化に伴い実験精度も悪くなるものと考えられる。

4. 湾内での年齢組成と位置組成

湾内の交換機構や物質輸送には、流れの振動成

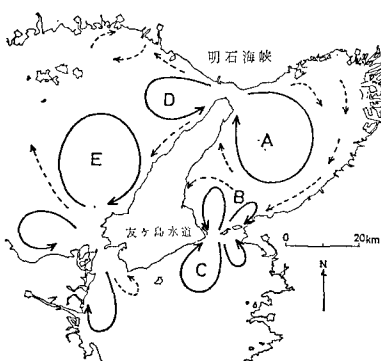


図-3 大阪湾周辺海域の環流分布(模型)

分よりも、分散の効果を含めた恒流成分の寄与が大きい場合が多いと見られる²⁾。そこで、湾内物質が各水域に存在する分散機能(特に恒流)によって、どのような経路をたどり、どの程度の期間で湾外に流出していくかを知ることが、湾全体の交換性を直接的に解明する上で必要である。即ち、湾内の物質を“列車”に例えれば、この列車がどんな路線を通り、どこに行くかを列車自身に乗って知ることを意味し、それには、湾内物質が湾外に出る経路=「位置組成」、その経過時間=「年令組成」を物質のラグランジュ的追跡から求めることが有効である。そこで、大阪湾を対象として、湾内での年令組成と位置組成の分布を明らかにする実験を行った。図-3には、これまで実験で得た、大阪湾周辺海域の潮汐残流(環流)の模式図を示す。各水域の流動場は、規模の異なる環流によって構成されている。

図-4には、大阪湾内代表点の20測点(図中左上)からボールを同時に放流し、M₂潮による実験から得た10周期間(約5日間)のボール追跡による位置組成を示す。なお、実験中は大阪湾の主要河川から年平均流量を連続放流した。図-4に示す各代表点からの移動は、湾中央に位置する時計回りの環流A(図-3)と友ヶ島水道側の湾口環流Bによって支配され、全体の位置組成が決定されている。即ち、湾北部(O_N)の淀川河口沖では、移動量は少なく、泉南沖に向かってゆっくりと南下する。泉南沖(O_E)からは、友ヶ島水道に向かって紀伊水道に抜けるものと、環流Aに取り込まれて明石海峡に向い北上する経路に分かれる。その分配は、環流外輪のシア場により左右される。湾中央環流域(O_W)では環流内を回転し、再び中央に戻されるコースと、大きく外輪に寄せられて明石海峡に抜ける動きの速いコースに分けられ

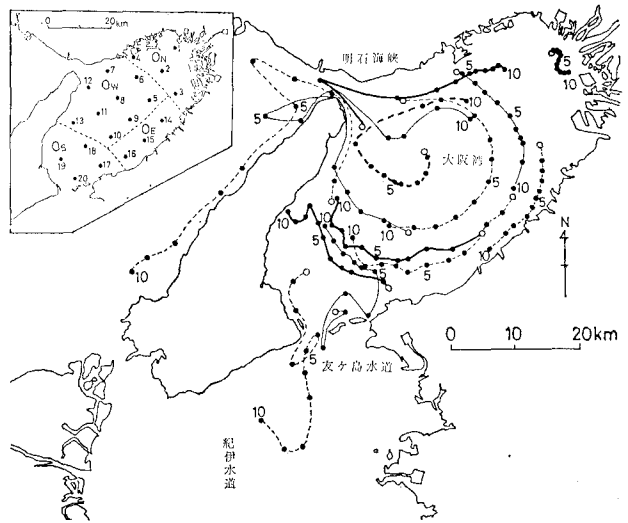


図-4 大阪湾の位置組成分布(左上は代表点位置)

る。一方、湾南部 (O_s) の友ヶ島水道環流域 B では、紀伊水道へ直接抜けるものと、環流 A との境界域でのシア一場にトラップされ、ゆっくりと北上する経路に分岐する。

以上のように、湾内の位置組成は代表点の流動場で決められるが、その経路の再現性は高い。しかし、湾内から一担、湾口部を通過すると、海峡部での複雑なシア一場と、スケールの異なる渦の影響を受けて輸送経路が分けられる。いわば、海峡部は路線の“乗り替え駅”の役割を持っている。

代表点で得られた年令組成から、湾内ボールが湾外に初めて出るまでの年令分布を、図-5 に示す。この図の上段には、明石海峡からと、友ヶ島水道 (図中陰影部) を初めて抜ける代表点の区分を示し、下段には代表点での年令を示したものである。淀川河口沖 (St. 1) では友ヶ島水道を抜けるまで、60 周期 (約 1 ヶ月) を最も長い年令を持ち、湾中央域 (O_w) では 10 周期 (約 5 日) と単期間で明石海峡を抜け、両者の水域的な年令差は大きい。しかし、初めて湾外に出たボールは再び湾内に戻る場合が多く、最終的に流出するまでには、これ以上の時間が必要であることに留意すべきである。

5. 閉鎖性湾内の物質交換と滞留時間

瀬戸内海の中でも閉鎖的な大阪湾、広島湾と、内海中央部の燧灘を対象として、ラグランジュ的海水交換実験を行った。ここでは特に、大阪湾、広島湾での物質 (ボール) 輸送分布について紹介し、従来から実施している染料によるオイラー的海水交換実験結果³⁾を含めて、交換機構と滞留時間について考察する。

(1) 実験内容

大阪湾交換実験 (Case-OS) では、湾内に 1 000 個、隣接する播磨灘、備讃瀬戸に 3 000 個、紀伊水道には 1 000 個、計 5 000 個の色分けしたボールを配置した。

広島湾交換実験 (Case-H-2) では、湾内を宮島瀬戸を境に湾奥部 (北部) と湾中央部 (南部) に 2 分し、各々、500 個と 1 000 個のボールを配置した。更に、湾外には伊予灘、安芸灘に 1 000 個のボールを配置した。

燧灘交換実験 (Case-HI) では、灘内に 2 000 個、東西の備讃瀬戸、安芸灘、伊予灘に各々 1 000 個のボールを配置した。

実験潮流として M_2 潮を与え、対象海域周辺的主要河川から年平均流量で連続放流し、350 周期間実験を行った。実験中の測定内容は前述と同様にして、スケッチ、写真撮影からボール追跡を行った。なお、これらの実験では、ボール数量が多いため、マグネット使用によるボールの初期位置固定はせず、現地 1km^2 当り約 1 個の比率になるよう均一に投入した。

染料による実験として、大阪湾 (Case D-OS) と広島

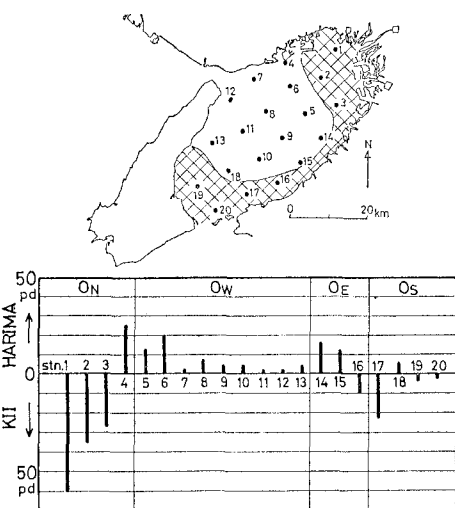


図-5 大阪湾の年齢組成 (下段) と流出先区分 (上段、陰影部は紀伊水道への流出、他は播磨灘へ)

湾 (Case D-H) で行い、湾内均一濃度の染料水を瞬間放流、その後の湾内濃度を連続測定した。本報では、この結果のみを引用し、内容の詳細は別に紹介したい。

(2) 大阪湾の輸送分布と交換機構

図-6 には、大阪湾内ボール (1 000 個) を対象とした 100 周期と 200 周期 (pd) のボール輸送分布を示す。

全体の分布は、前述のごとく環流に支配されているが、環流域の内外では、流れ場にに応じた分散機構により、収束域と発散域が顕著に見られる。200 周期では大阪湾中央の環流域外輪に、シア一場にトラップされたボールが帯状に収束し、ゆっくりと明石海峡に北上する分布が見られる。一方、環流 A (図-3) 内部には、明石海峡から再び戻されたボールが発散しながら分布している。この傾向は他の水域でも明確に見られ、ボール自身が鉛直流の寄与を取り込むことによる効果と見られる。

大阪湾のボール残留量と他水域への輸送量の時間変化を 350 周期まで示したのが図-7 (左図) である。

大阪湾内のボールは 100 周期まで半減し、それ以降の減少量 (流出) は微量である。350 周期での分配量は、大阪湾、紀伊水道、播磨灘で各々、37、30、32% である。備讃瀬戸へはほとんど輸送されていない。一方他水域からの大阪湾内へのボール流入量は、湾内ボールの流出量とはほぼ一致していた。200 周期以降では湾全体のボール変動量が少なく、初期水域での代表性が無くなるため、実験精度上その取扱いが問題となる。

(3) 広島湾の輸送分布と交換機構

広島湾中央部に配置した 1 000 個のボールについて、100 周期目での輸送分布を図-8 に示す。広島湾中央では、反時計回りの環流により湾口部附近のボールは一挙に湾外に流出し、湾奥のボールはゆっくり南下し、湾口

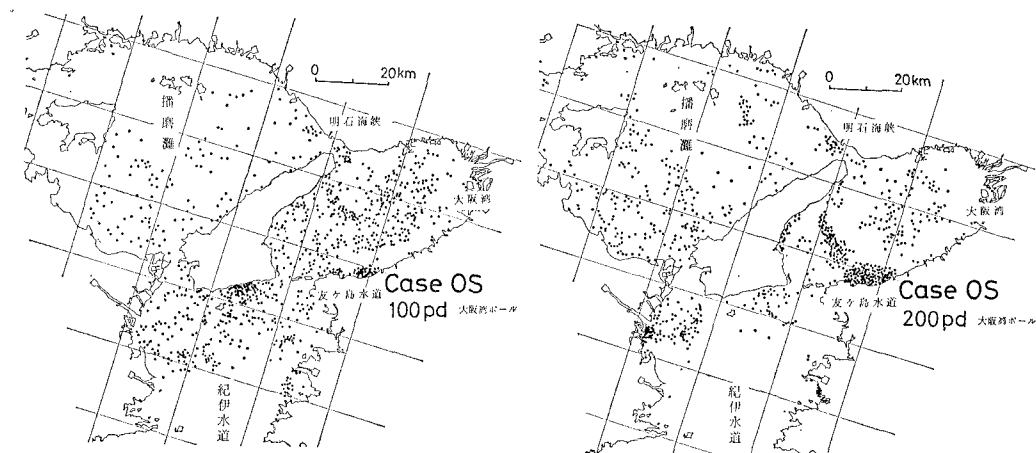


図-6 大阪湾のボール輸送分布 (左図: 100 周期, 右図: 200 周期, 初期投入数 1 000 個)

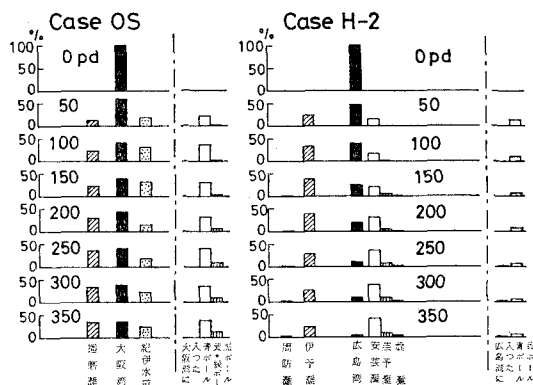


図-7 各水域へのボール分配量 (左図: 大阪湾, 右図: 広島湾)

(大島瀬戸, 柱島水道) から伊予灘, 安芸灘に流出する。湾外に流出したボールは, 更に周防灘, 燧灘へと輸送されていく。これらの輸送分布は染料実験 (Case D-H) の拡散分布とよく対応するものであった。

広島湾中央ボールの残留量と他水域への分配量の時間変化を大阪湾と同様にして 図-7 (右図) に示す。

50 周期目で 52% に半減し, 150 周期で 27% に減少する。湾中央部のみでは, 大阪湾に比べ交換は速いが, 湾奥部 (北部) 水域を含め, 湾全体として見れば反対に遅くなる。200 周期以降の湾内ボールの減少傾向は鈍化し, 150 周期程度で湾全体の交換規模が決る。他水域からの広島湾内への流入は, 大阪湾に比べ少なく, 湾口部での鉛直的な交換機構の相違によるものと見られる。

(4) 滞留時間の定義と算出結果

海水交換の定量的な扱いについては, 対象水域に含まれる物質の残留量 (または残

少量) の時間変動を明らかにし, 全体物質に対する残余関数を求め, 対象水域に存在する物質が, 湾外に出ていく期待値としての滞留時間を評価する。

滞留時間を含め, 海水交換に関連する時間スケールの定義については, 先に, 武岡⁷⁾, 宇野木⁸⁾によって詳しく論じられており, これらに従って解析する。

今, 定常か, 非定常かを問わず, 時刻 $t=0$ に海域内に質量 R_0 の物質があったとし, 時刻 t には湾内 $R(t)$ だけ残留していたとする。時刻 $t=0$ に海域外に出る物質量は単位時間当たり $-dR(t)/dt$ であり, $R(\infty)=0$ とすれば, 対象物質が外に出るまでの滞留時間は, 次式によって示される。

$$\tau_r = \frac{1}{R_0} \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dR}{dt} \right) dt = \frac{1}{R_0} \int_0^{\infty} R dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\gamma(t) = R(t)/R_0$ とおけば,

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \gamma \cdot dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

と示すことができる。この $\gamma(t)$ が残余関数である。

そこで, (2), (3) 式を適用し, 流れが定常な場で, 瞬間放流されたボール及び染料による実験結果から, 残余

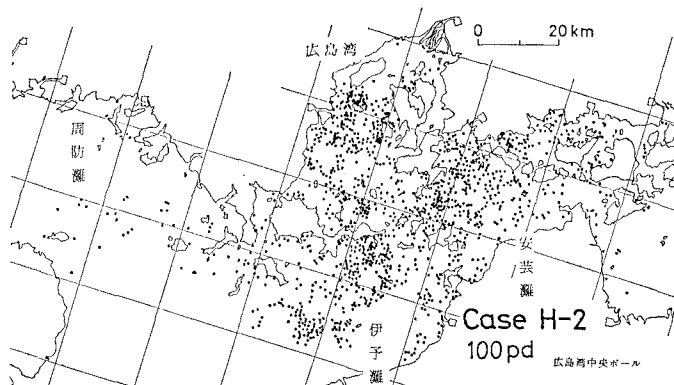


図-8 広島湾のボール輸送分布, 100 周期目 (湾中央ボール, 1 000 個)

表—2 各水域の交換時間及び、滞留時間（ボール、染料による）

実験 Case	対象周期 pd	残留量回帰式		交換時間												滞留時間 τ _r
		N=ex	%	90	80	70	60	50	40	30	20	10				
OS	0-150	X=4.528289-0.007100t		13	31	49	71	100	130	168	225	310		140pd		
HI	0-150	X=4.458988-0.006324t		16	35	57	91	110	146	190	255	364		158pd		
H-2	0-150	X=4.539742-0.005678t		18	39	63	90	122	161	212	283	405		176pd		
D-OS	0-150	X=4.529969-0.007199t		14	31	49	70	94	128	166	220	324		139pd		
D-H	0-120	X=4.515838-0.006600t		17	35	54	76	104	140	180	224	291		151pd		

関数（残留量回帰式）を求め、滞留時間 τ_r を算出した。

表—2 には、大阪湾（OS）、広島湾全域（H-2）、燧灘（HI）の各実験ケースについては実験精度の高い 150 周期までの残留量（%）に対する残余関数と、交換時間（1 pd は半日に相当）、滞留時間 τ_r を示す。更に、染料実験による大阪湾（D-OS）、広島湾（D-H）での結果も同様に示した。

大阪湾（OS）、広島湾（H-2）、燧灘（HI）での 50% 交換期（半減期）は、各々、1.7 月、2.0 月、1.9 月であり、90% 交換（10% 残留量）に要する時間として、各々、5.1 月、6.8 月、6.1 月の値となっている。これらの滞留時間 τ_r についても、大阪湾で $\tau_r=2.3$ 月、広島湾で $\tau_r=3.0$ 月、燧灘で $\tau_r=2.6$ 月の値が得られた。

以上の結果から、広島湾全域では大阪湾に比べ交換性は悪く、湾内地形と環流規模の相違によるものと考えられる。一方、燧灘では、広島湾より交換はよいが大阪湾に比べ多少悪い。これらの交換時間は、湾内物質が隣接する湾、灘と交換する時間スケールであり、外洋水と直接交換する時間ではない。

染料による実験値では、大阪湾（D-OS）の値はボールによる結果と同じであり、広島湾（D-H）では、ボールの場合より少し速くなっている。しかし、実験手法の相違と、拡散スケールに対するトレーサの追従性、及び空間場の扱い方の違いを考慮すれば、両者はよく一致していると言える。

6. 結 語

瀬戸内海大型水理模型に於て、ボールを用いたラグランジュ的手法による海水交換実験を行い、実験精度と位置組成、年令組成について考察し、残余関数から滞留時間を解析し、次の結果を得た。

(1) ラグランジュ的手法による実験の再現性は高く、大阪湾では 150 周期まで

安定した値が得られた。

(2) 湾内の年令組成、位置組成は湾内環流規模に大きく関与し、シア場からトラップされる収束域と、環流内での発散域が明確となった。

(3) 大阪湾、広島湾全域、燧灘での滞留時間は、各々 2.3 月、3.0 月、2.6 月と湾奥の深い広島湾で最も遅い値となる。同様に 90% 交換時間として、5.1 月、6.8 月、6.1 月の値となる。

(4) 染料によるオイラー的な実験結果から得た滞留時間は、ボールによるラグランジュの実験の値とよく一致する結果を得た。

今後、ラグランジュの実験を進める中で、交換に関与する他の時間スケールによる評価を進め、瀬戸内海全域の残余関数を詳しく求めて行きたい。本研究は環境庁一括計上の公害防止技術特別研究「瀬戸内海における海水交換性および負荷量影響度の研究」の一環として行ったものである。本研究に際し、理化学研究所宇野木早苗先生には貴重な御助言を頂き、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 早川典生 他：水理模型による瀬戸内海拡散現象の実験的研究，第 24 回海講論文集，pp. 496~499, 1977.
- 2) 上嶋英機・早川典生：瀬戸内海の物質拡散、分散特性、沿岸海洋研究ノート，Vol. 20, No. 1, pp. 1~11, 1982.
- 3) 上嶋英機 他：瀬戸内海水理模型による水質汚濁拡散実験，第 29 回海講論文集，pp. 575~579, 1982.
- 4) 武岡英隆：海水交換の物質輸送の概念について，愛媛大学工学部紀要，第 9 巻，第 4 号，pp. 287~298, 1981.
- 5) 西条八束編：内湾の環境科学，（上巻），培風館，pp. 63~160, 1984.