

# 広島湾北部海域の流動構造と海水交換特性

川 西 澄\*

## 1. はじめに

広島湾北部海域はきわめて閉鎖性が強く、富栄養化や赤潮が社会問題化してすでに久しい。広島湾内部には大小の多くの島が存在し、非常に複雑な地形をしている。そのため、海水が動きやすい場所と停滞しやすい場所が発生し、汚染水や赤潮の分布に強く影響していると考えられる。そこで、従来の研究では湾内をいくつかの海区に分け、現地観測資料や水理模型実験によって、これらの海区ごとの海水交換性が調べられているが(木村, 1975; 上嶋ら, 1986), 発生している赤潮パッチの空間スケールを考えると、区分けされた海域の大きさは大きすぎる。さらに、湾奥に流入している流量豊富な太田川や海上風が湾内の海水交換に大きな影響を与えていると考えられるので、河川流量の変動や風の存在が海水交換率の変動と定量的にどう関わり合っているかを明らかにする必要がある。

本論文では、準3次元傾圧モデルを用いて広島湾北部海域における海水流動の数値実験を行い、海水流動の3次元構造を明らかにするとともに、赤潮パッチの空間スケールに対応するような小海域における残余関数を求めて、各小海域の平均滞留時間と河川流量および風の関係を検討する。さらに、湾内の小海域における海水交換性と赤潮の発生海域との関連について議論する。

## 2. 数値実験

### (1) 計算概要

数値モデルとしてPOM (Blumberg ら, 1987) を使用して数値実験を行った。POM は鉛直方向の粘性・拡散係数の計算に Mellor ら (1982) のレベル 2.5 乱流モデルを使っている。一方、水平粘性係数は次式で示す Smagorinsky 粘性として与える。

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $u, v$  はそれぞれ東西、南北方向の流速成分である。本研究ではパラメーター  $C$  として、0.2 を用いた。

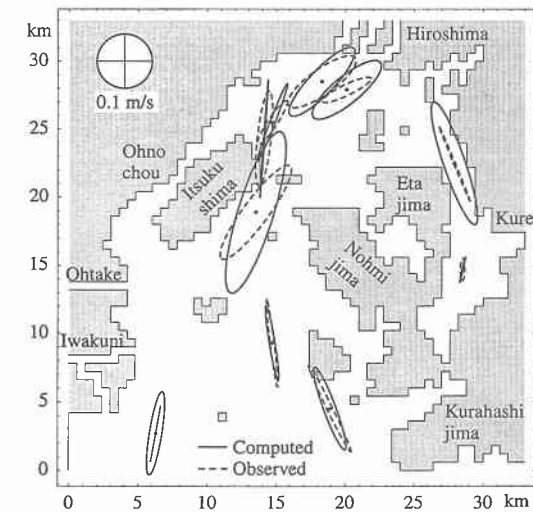


図-1 潮流精円

水平格子間隔  $\Delta x, \Delta y$  はともに 600 m とし、鉛直方向は  $\sigma$  座標  $= -0.025, -0.075, -0.15, -0.3, -0.5, -0.7, -0.85, -0.925, -0.975$  の 9 層に分けた。内部時間ステップは 2 秒、外部時間ステップは 60 秒とした。

夏季の成層期を想定し、海面に  $200 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$  の熱フラックスを与えると同時に、湾北(奥)部に流入している太田川と湾西部に流入している小瀬川、錦川の河川流量としてそれぞれ  $R_1=126\sim756 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $R_2=9\sim54 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $R_3=30\sim180 \text{ m}^3/\text{s}$  を与えた。河川の水温は  $25^\circ\text{C}$ , 塩分は 20 psu とした。また、海域の初期条件は水温  $23^\circ\text{C}$ , 塩分 32.5 psu とした。

広島湾湾口部の潮汐データが入手できなかったこと、湾口部が多数の島に囲まれて複雑なことから、倉橋島の 3.7 km 南の湾内に開境界を設定し、振幅 1 m の半日周潮の潮位変動を与えた。本研究で対象としている湾北部海域に対しては、このような開境界でも実際の海況を再現できると考えられる。

### (2) 数値モデルの再現性

数値シミュレーションによる潮流場の再現性を確認するため、 $M_2$  潮流精円の実測値との比較を行った結果を図-1 に示す。広島湾の平均水深は、厳島と能美島に挟ま

\* 正会員 工博 広島大学 助教授 工学部第四類

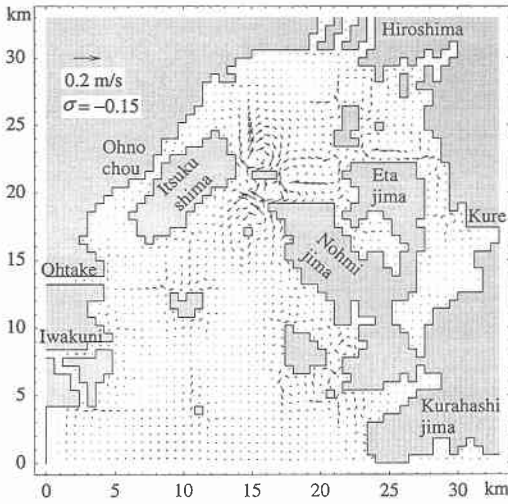


図-2 潮汐残差流

れた宮島、奈沙美瀬戸より北の湾奥部で約 18 m, 南の湾中央部で約 30 m である。潮流楕円の実測値は中国工業技術研究所, 海上保安庁水路部, 広島大学による 15 日間の連続観測から得られたもので(肥後ら, 1980), 測点の水深は 10 m 以浅である。

ほとんどの測点で計算値と実測値の一致の程度は良好で, 湾北部海域の潮流場はうまくシミュレートされていると考えられる。また後述するように, 残差流と塩分の水平分布の計算値もほぼ実測分布の傾向を再現している。

広島港と呉港における  $M_2$  振幅の計算値はそれぞれ 1.08 m と 1.1 m であり, 実測値の 1.02 m と 1.03 m に比べて大きい, これは開境界で与えた振幅 (1 m) がやや大きめであったためである。

### 3. 結果および考察

#### (1) 残差流と平均塩分の水平分布

広島湾の地形によって発生する残差流を調べるため, 無風状態で一様な密度場における潮汐残差流を計算した。計算開始から 10 日目の潮汐周期平均流速を図-2 に示す。潮流の速い厳島と能美島に挟まれた宮島, 奈沙美瀬戸付近にいくつかの循環流がみられるが, その他の海域には特に目立った残差流は認められない。

図-3 は河川流量  $R_1=252 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $R_2=18 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $R_3=60 \text{ m}^3/\text{s}$  を与えた時の残差流分布を示したものである。なお, 2. で述べた範囲で河川流量を変えても残差流の分布パターンに大きな変化はなかった。表層における図-3 (a) には, 太田川河口から 0.1 m/s 程度の流速で南下する流れがみられる。この南下流の一部は厳島と能美島間に

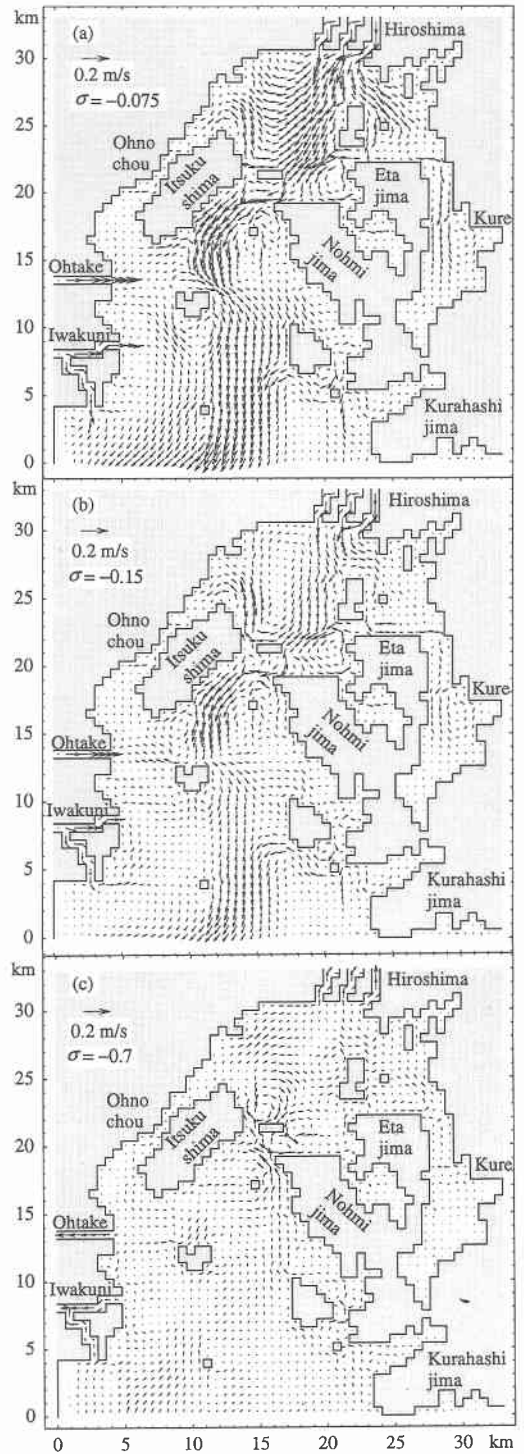


図-3 無風状態での残差流

した後, 大野町と厳島に挟まれた大野瀬戸に流入している。一方, 大奈沙美島と能美島に挟まれた奈沙美瀬戸を通過した南下流は厳島東岸沿いを南下する。

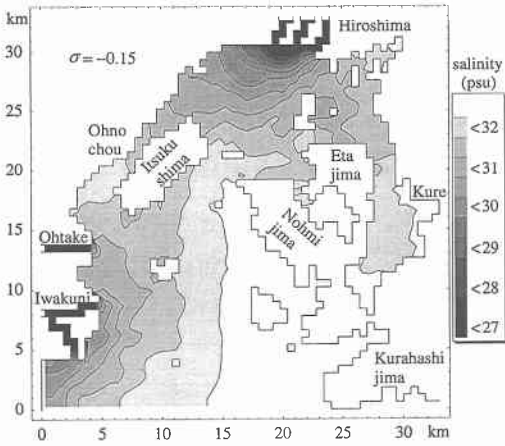


図-4 上層の塩分分布

上層 ( $\sigma = -0.15$ ) の分布 (図-3(b)) をみると、湾奥部に時計回りの循環流が形成されていることがわかる。潮汐残差流 (図-2) にはこうした循環流は認められないことから、これは大阪湾や伊勢湾でも確認されている重力循環にともなう高気圧性循環流 (藤原, 1994) であると考えられる。現地観測から求められている残差流の分布は、測点ごとに観測時期が異なるなど信頼性の問題があり、詳細な比較検討は困難であるが、計算結果と同様に、湾北部には時計回りの循環流が存在することが示されている (上嶋ら, 1982)。

図-3(c) に示した下層の残差流分布から、重力循環にともなう下層流は能美島西岸を北上することがわかる。また、宮島、奈沙美瀬戸付近には図-2 と同様な地形性残差流が認められる。

図-4 は上記の計算における上層の塩分分布を示したものである。湾北 (奥) 部から南下する塩分の低い海水は湾の中心から西岸に沿って分布し、一方、外洋性の影響が強い高塩分の海水は湾の東側に分布している。こうしたシミュレーション結果は、現地観測や水理模型実験の結果と良く一致している (上嶋ら, 1982)。江田島と能美島に囲まれた江田内湾は高塩分海域となっており、太田川河川水の影響をほとんど受けていない。

広島湾は南北方向の風が卓越しやすく、風が流動場に与える影響が大きいとされている (木村, 1975; 高杉ら, 1998)。そこで、5 m/s の北風を 10 日間吹かせた結果を図-5 に示す。河川流量は図-3 の場合と同じである。表層では密度流と相まって、湾奥部で 0.2 m/s を越す南下流が発生している (図-5(a))。上層での分布を示した図-5(b) をみると、無風状態の湾奥部上層でみられた大きな時計回りの循環流は消失している。また、厳島東岸を南下する残差流も変化し、一部が大竹市沿岸に向かい、湾西部沿岸沿いを南下している。能美島西岸を北

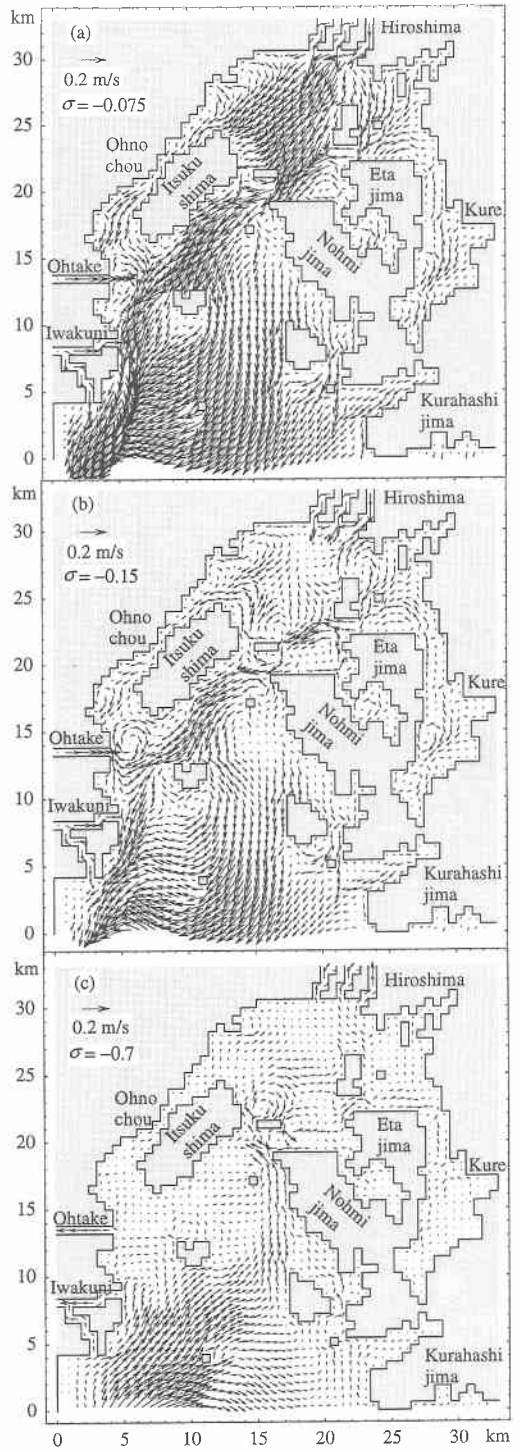


図-5 吹送密度流

上する下層流の強さは、無風状態のものに比べて強められている (図-5(c))。

図-6 に示す上層の塩分分布をみると、湾奥部でも等

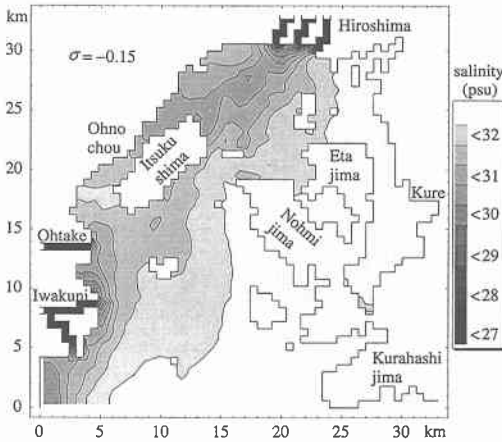


図-6 北風が吹いた時の上層塩分分布

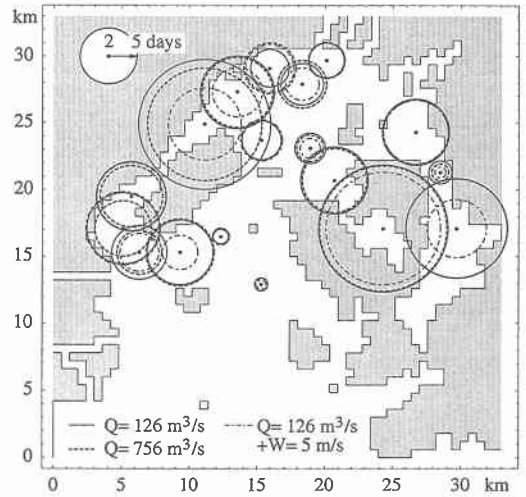


図-7 平均滞留時間

濃度線が南北方向に立っており、無風状態のものに比べ、低塩分水が西側に分布する傾向が強くなっている。こうした傾向は中辻ら(1995)による東京湾のシミュレーションにおいても指摘されている。さらに、無風状態の場合に河口部にみられた 27 psu 以下の領域は、湧昇によって消失している。

(3) 局所的な海水交換性と赤潮

湾内の局所的な海水交換性を明らかにするため、湾内の 18 地点の小海域 (1 200 m×1 200 m) に投入した拡散物質の時間変化  $R(t)$  から平均滞留時間を求めた。平均滞留時間  $\tau_r$  は次式で求められる (武岡, 1984)。

$$\tau_r = \int_0^{\infty} R(t)/R_0 dt = \int_0^{\infty} r(t) dt \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $R_0$  = 初期物質質量、 $r(t)$  = 残余関数である。ただし、本研究では、拡散物質の時間変化を 14 日分しか計算していないので、積分の上限は 14 日となるが、平均滞留時間の定性的な分布特性は把握できると思われる。結果を図-7 に示す。円の半径が滞留時間を表しているが、滞留時間の変化を拡大して表示するため、滞留時間 2 日を半径 0 としてある。

湾内 18 箇所の小海域間の滞留時間の違いは大きく、もっとも交換性の悪い江田内湾や湾西部に位置する大野瀬戸北部海域の滞留時間は湾中央部の 3 倍余りの大きさである。ただし、滞留時間を求める際の積分時間が 14 日に限られていることを考えると、実際の滞留時間の差はもっと大きくなる可能性がある。

大野瀬戸北部海域の滞留時間が長いのは以下の理由による。瀬戸北部海域では、上げ潮時、瀬戸を北上する流れと厳島東岸を北上し、厳島の北側を回り込んで北東から瀬戸に流入する流れがぶつかり、また下げ潮時には、この海域を起点として北東と南西方向に流れるため、流れが著しく弱くなっているためである。

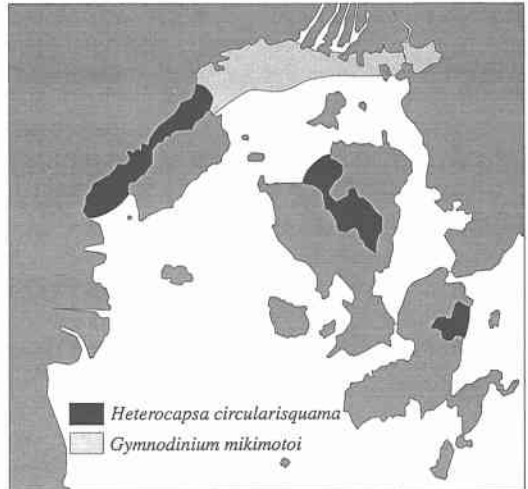


図-8 赤潮の発生海域

ボックスモデルによる解析によれば、河川流入量が海水交換性に大きな影響を与えると言われている (木村, 1975; 宇野木, 1998)。図-7 をみると、河川流量の増加に対する滞留時間の変化は各小海域で異なり、例えば、河川水の影響を受けやすい大野瀬戸では河川流量の増加にともないその滞留時間は短くなっているが、広島湾の東寄りに位置する江田内湾や呉湾ではほとんど滞留時間に変化はみられない。

滞留時間に対する風の影響は、場所によってはかなり大きく、停滞性の強い大野瀬戸北部海域で約 35%、呉湾で約 30%ほど無風状態にくらべて滞留時間が短くなっている。

養殖カキ等に甚大な被害をもたらしている *Heterocap-*

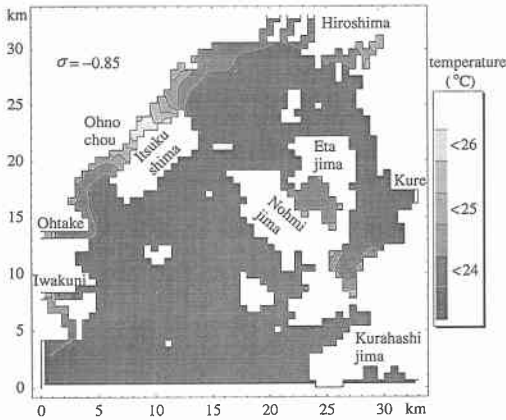


図-9 底層の水温分布

*sa circularisquama* などの渦鞭毛藻類は、広島湾のような富栄養化した海域で栄養塩濃度が増殖速度の律速要因になることは少なく、海水の停滞性が強く、かつ底層付近まで水温が高い海域で赤潮を形成するといわれている。なかでも *Heterocapsa circularisquama* はポピュレーションの動向が海水流動の強さに著しく左右され、小潮時に細胞数を増加させ、大潮の時に減少する傾向を示す(松山, 1997)。

図-8に赤潮の発生が頻発している海域を示す。*Gymnodinium mikimotoi* は湾奥沿岸から大野瀬戸にかけて発生している(大野瀬戸では *Heterocapsa* 赤潮領域と重なっている)。一方、*Heterocapsa circularisquama* は大野瀬戸に加えて、江田内湾でも大量発生している。図-9に示す底層の水温分布を考慮すると、*Heterocapsa* や *Gymnodinium* といった鞭毛藻類からなる赤潮が、海水の停滞性が強く、底層まで水温が高くなる海域で発生していることがわかる。呉湾は海水交換性が悪いものの、水深が深く底層まで水温が高くないため、赤潮が発生しないものと考えられる。

#### 4. おわりに

3次元傾圧モデルを用いた数値実験から、広島湾北部海域の海水流動と海水交換性について検討した。以下に主要な結果を述べる。

無風状態では湾奥上層に重力循環にともなう高気圧性循環流が認められる。宮島、奈沙美瀬戸の南では、上層水は湾の西側に位置する厳島の東岸を南下し、下層水は

湾の東寄りに位置する能美島の西岸を北上する。

湾内小海域の平均滞留時間は場所によって大きく異なる。河川水の流量増加に対して、湾西部の大野瀬戸では平均滞留時間が短くなるが、広島湾東寄りに位置する江田内湾や呉湾ではほとんど滞留時間に変化はみられない。北風の連吹により、海水交換性の悪い大野瀬戸北部海域や呉湾ではかなり滞留時間が短くなり、海水交換性がよくなる。

鞭毛藻類の赤潮の発生が頻発している海域は、海水交換性が悪く底層まで海水温が高くなる海域に対応している。

謝辞：広島湾の潮汐・潮流に関する現地観測資料を提供頂いた中国工業技術研究所の高杉由夫博士、赤潮に関する貴重な助言を頂いた瀬戸内海区水産研究所の松山幸彦研究員に感謝します。

#### 参考文献

- 上嶋英機・早川典生 (1982): 瀬戸内海の物質拡散, 分散特性, 沿岸海洋研究ノート, 20巻, 1号, pp. 1-11.
- 上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・宝田盛康 (1986): 湾内水塊の海水交換性—広島湾を対象にした海水交換実験より—, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 571-575.
- 宇野木早苗 (1998): 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, 7巻, 5号, pp. 283-292.
- 木村知博 (1975): 広島湾海域に流入する淡水の移流について, 水産増殖, 22巻, 3, 4号, pp. 110-119.
- 高杉由夫・埜口英昭・安田秀一 (1998): 広島湾における風による鉛直循環流と底泥プランクトンシスト分布, 水産海洋研究, 62巻, 3号, pp. 187-198.
- 武岡英隆 (1984): 沿岸海域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, 21巻, 1号, pp. 169-182.
- 中辻啓二・尹 鍾星・白井正興・村岡浩爾 (1995): 東京湾における残差流系に関する三次元数値実験, 海岸工学論文集, 42巻, 1号, pp. 411-415.
- 肥後武彦・高杉由夫・田辺弘道 (1980): 瀬戸内海全域の潮流について, 中国工業技術試験所報告, 12号, pp. 81-120.
- 藤原建紀 (1994): 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性—内湾奥部にみられる高気圧性渦—, 沿岸海洋研究ノート, 31巻, 2号, pp. 227-238.
- 松山幸彦 (1997): 再びヘテロカプサ赤潮, 南西水研ニュース, 66号, pp. 6-7.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, Three Dimensional Coastal Ocean Models, American Geophysical Union, Washington, D. C. pp. 1-16.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., Vol.20, pp. 851-875.