

流況制御による環境修復技術の現地への適用性について

山崎 宗広*・村上 和男**・早川 典生***

著者らは、流況を制御して海域環境を修復する方法として、湾口部の深みを埋め込む地形改変工法を提案してきた。本研究では、この地形改変工法による流動変化のメカニズム解明と現地への適用性について検討した。既存データの解析より、湾口部に深みを持つ小内湾の閉鎖度指標と湾内外比の COD との間には正の相関関係が認められた。水槽実験より、地形改変は過度の発達、輸送、減衰の変化として現れることが分かり、地形改変によって形成される循環流の形状は、湾幅、湾長の水平形状の比が異なっても円の形を呈し、地形改変の効果は湾の水平形状の要素が入っているパラメータと海水交換量との関係で示した。

1. ま え が き

瀬戸内海には、地形的に閉鎖された湾・灘が多く存在し、海水交換が極度に悪い停滞性水域が分布している。停滞性水域では、排水の総量規制等の努力にも拘わらず、未だに赤潮の発生や貧酸素水塊の形成といった水質環境問題を抱えている。このような海域の水質環境を改善していくためには、陸側からの負荷削減努力を続ける一方で、海側から海を持つ潮流等の自然エネルギーを積極的に制御して海水交換を促進させることが重要ではないかと考える。

このような観点に立って著者ら (1998, 2000) は、閉鎖性内湾の流動環境の改善や海水交換促進のために、湾口部の地形改変工法を提案し水槽実験により検討してきた。その結果、湾口部の深みを埋め込んで水深を浅くする地形改変工法は、湾口部での潮流を増大させて水平的な循環流を誘発し、海水交換の改善に効果的な手段になることが定性的に分かった。この地形改変による流動の変化は、湾口部で発生する過度の発達、輸送、減衰が大きく関与しているものと思われる。

実海域に地形改変工法を適用するためには、何がその流動を発生させるのか、またどのような空間スケールの湾に対して効果があるのか海水交換との関係で明らかにしておくことが重要である。そこで本研究では、現地への適用性を検討するために、先ず瀬戸内海の中で湾口部に深みを持つ小内湾の地形特性、水質環境を既存データより整理し、その代表的な湾として徳山湾の現地調査を行い海域環境を検討した。次に地形改変工法のメカニズムを明らかにする水槽実験、また様々な水平形状の湾に対する地形改変効果をみるために、湾幅や湾長、湾口幅を変化させた水槽実験も行い検討した。

2. 湾口部に深みを持つ小内湾の諸特性

流況制御によって海水交換を促進するためには、その海域の地形特性、流れ等の物理特性、および現状の水質環境特性を良く把握する必要がある。

ここでは地形改変工法による現地への適用性の検討のために、湾口部に深みを持つ小内湾の地形特性と水質環境特性を既存データより整理した。小内湾は瀬戸内海の家図よりピックアップし、全部で 13 海域とした。使用したデータは、地形情報として数値地図データ (国土地理院) と家図 (日本水路協会、デジタルデータと紙面) を利用し、水質環境情報として公共用水域水質データと浅海定線調査データ (和歌山県水試, 2000; 兵庫県水試, 2000; 広島県水試, 2000; 山口県水試, 2000) を利用した。表-1 は湾口部に深みを持つ小内湾の諸情報を整理し示したものである。表中の D1 は湾口部も含めた湾内の最大水深, D2 は湾口部における最大水深, D3 は湾内平均水深, D4 は湾口部平均水深であり, COD は年平均値のものである。取り上げた内湾の大きさは数 km から 10 km ほどであり、殆どの内湾が湾口部に最大水深を持っている。

地形形状と水質との関わりを捉えるために、地形形状より閉鎖性の度合を表す閉鎖度指標を、湾内の水質の指標として COD を取り上げる。閉鎖度指標は、西田 (1978) が提案したものであり、湾内および湾口部の最大水深を用いて算出される。なお閉鎖度指標の算出には、この最大水深を用いるより、平均水深を用いた方がより良く地形形状を表現できるのではないかと考え、平均水深からも算出した。最大水深と平均水深より求めた閉鎖度指標の値を地形形状を示した表-1 の中に示す。平均水深を用いた閉鎖度指標の値は、殆どの湾が 0.5 以上であり、1 以上の湾もいくつか見受けられる。閉鎖性の強い小内湾は、湾口部で流れが速いために深みを持つ場合が多い。

図-1 は、平均水深より求めた閉鎖度指標と COD との関係を示したものである。図の横軸の COD は湾内における COD と湾外における COD との比で整理している。

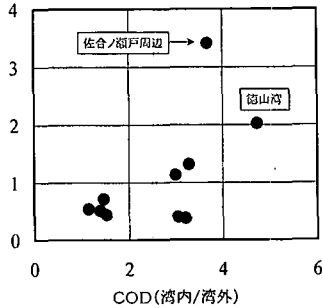
* 正 会 員 (独法)産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門
** 正 会 員 工 博 (独法)産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門
*** フェロー Ph.D. 長岡技術科学大学教授 環境・建設系

表一1 湾口部に深みを持つ小内湾の地形・水質情報のまとめ
(D1: 湾内最大水深, D2: 湾口部最大水深, D3: 湾内平均水深, D4: 湾口部平均水深)

小内湾名	表面積 S(km ²)	湾幅 B(km)	湾長 L(km)	湾口幅 W(km)	湾長/湾幅 L/B	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	D4 (m)	閉鎖度指標 (最大水深)	閉鎖度指標 (平均水深)	湾内 COD (mg/L)	湾外 COD (mg/L)	人口/容積 (×10 ⁴ 人/km ³)
比井湾(K)	4.0	2.1	2.1	2.5	1.0	31	31	12	24	0.81	0.41	—	1.23	15.0
内海湾(H)	14.3	1.6	7.8	3.6	4.9	40	40	13	27	1.05	0.51	1.70	1.22	6.8
鼠島湾(B)	5.6	2.2	3.7	2.7	1.7	14	14	3	6	0.88	0.44	1.70	1.12	39.4
坂出湾(B)	12.5	1.7	6.3	3.4	3.6	32	32	11	16	1.03	0.71	1.80	1.23	42.9
松永湾(G)	11.2	3.4	5.5	0.5	1.6	20	20	2	13	7.34	1.13	1.90	0.64	412.9
三津湾(A)	13.7	3.7	3.3	5.6	0.9	34	34	8	14	0.66	0.38	2.00	0.63	11.2
三津口湾(A)	4.5	1.9	2.8	2.1	1.5	34	34	6	15	0.99	0.40	1.90	0.63	47.5
奥ノ内湾(A)	6.7	1.6	3.4	2.2	2.1	50	50	8	18	1.16	0.51	—	0.75	28.3
小部湾(A)	5.3	2.6	2.5	3.1	0.9	20	20	11	15	0.73	0.53	1.00	0.87	—
奈佐美瀬戸周辺(H)	128.3	10.3	11.9	4.2	1.2	62	62	18	37	2.70	1.31	2.40	0.73	48.8
鹿ノ川内湾(H)	6.1	1.3	4.3	2.3	3.3	40	40	13	22	1.07	0.63	—	0.73	11.6
佐合ノ瀬戸周辺(S)	27.1	5.2	4.8	1.1	0.9	35	29	17	24	5.80	3.41	1.60	0.44	4.1
徳山湾(S)	46.8	4.6	9.7	2.4	2.1	36	36	13	18	2.80	2.02	2.20	0.47	17.2

(K: 紀伊水道, H: 瀬戸内海, B: 備前瀬戸, G: 備後瀬戸, A: 安芸瀬戸, H: 広島湾, S: 周防瀬戸)

閉鎖度指標 (平均水深)



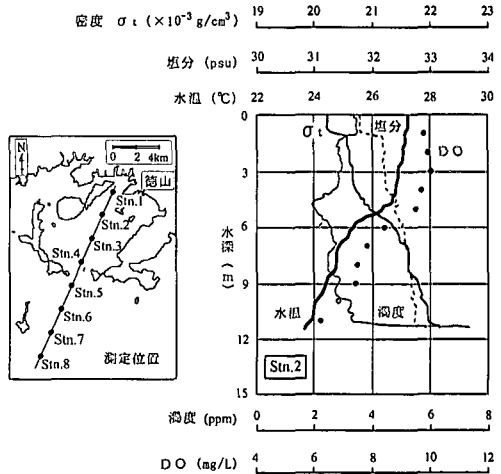
図一1 閉鎖度指標と COD との関係

図をみると佐合ノ瀬戸周辺海域を除けば、閉鎖度指標と湾内外比の COD との間には明瞭な正の相関関係が認められ、湾内外比の COD の値は徳山湾が一番大きい。なお佐合ノ瀬戸周辺海域は、汚濁負荷量の指標と考えられる単位海域容積当たりの流域内人口の値が 4.1×10^4 人/km³ と一番小さくなっており、流入負荷量も小さいものと推測され、閉鎖度指標が大きいにも拘わらず COD 値が小さかったものと思われる。

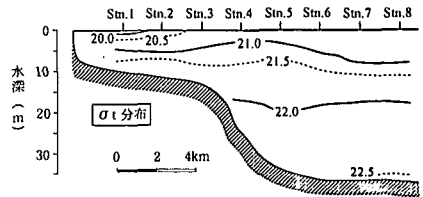
3. 徳山湾の現地調査

2章でみてきたように、徳山湾は湾口部に深みを持つ代表的な閉鎖性内湾である。この徳山湾の海域環境を把握するために現地調査を行った。調査は2001年8月27日の夏季の時期に水温、塩分、濁度、DOの測定を行った。

図一2は、観測地点と湾奥部に位置する Stn. 2 の観測結果を示したものである。湾奥部では上層と下層の水温差が大きく、底層では貧酸素の傾向が強くなっており海水の停滞性が伺える。図一3は、水温と塩分の値を使って計算した σ_t ($\rho = 1 + 10^{-3} \sigma_t$, ρ : 密度) の分布を示したものである。図にはは示していないが湾奥から湾口部、湾外にかけて鉛直方向に水温成層が発達しており、上層と下層の密度差 $\Delta \sigma_t$ の値は2以上にもなっている。



図一2 観測地点と湾奥部 Stn. 2 の海洋構造



図一3 σ_t の鉛直断面図

4. 地形改変工法による流動変化の機構

湾口部の深みを埋め込んで水深を浅くする地形改変工法は、湾口部での潮流を増大させて水平的な循環流を誘発し、海水交換の改善に効果的な手段になることが定性的に分かっている(山崎ら, 1998)。この地形改変による湾内の流動変化を発生させるメカニズムの検討として、湾口部で発生する渦度の発達・輸送・減衰と湾口部の地形条件、外力としての潮汐条件との関連を焦点に、矩形湾での水槽実験を実施した。

4.1 実験方法

水槽実験は、前報（山崎ら，1998）と同様にした。すなわち、湾口部に深みを持つ矩形湾（湾規模 3 m×3 m，湾口幅 30 cm）と，流況改善のためにその深みを埋め込んだ矩形湾を取り扱い，湾内水深，潮汐振幅，潮汐周期を現地スケールを想定して変化させ，実験ケースはこれらの組合せにより 14 ケースとした。水平スケールの違う湾に対しての検討は，潮汐周期を変化させることで行った。Froude の相似則を採用すると，潮汐周期が短くなるほど湾の水平スケールが大きくなり，実験で扱う湾の現地規模は，一辺が 6 km，8 km，12 km のものである。表－2 に実験ケースを示す。

流動場の解析は，浮標ボールの動きを撮影した VTR より PTV システムを用いて行い，湾内全域における渦度の発達過程，潮汐残差流の分布，平均滞留時間に与える影響を調べた。なお実験水槽と実験地形の詳細については，山崎ら（1998）を参照されたい。

4.2 PTV による実験結果と考察

湾内の循環流は，上げ潮期に湾口で形成される渦度が湾内に輸送されて集積し作り出される。このことから湾内全域の渦度の変化について考察する。

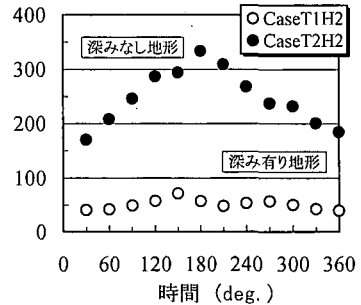
図－4 は，湾内における平均渦度の時間変化を湾口部の下げ潮後の憩流時を 0 deg.として示したものである。この平均渦度は，3 時刻パターンマッチング法 PTV アルゴリズム（西野ら，1992）を用いた流体計測システムにより湾内全域の流速分布を求め，その流速を 20×20 のメッシュ上にデータを補間して得た。両実験ケースとも湾内の平均渦度は，上げ潮期に発達して下げ潮期には減衰している。しかし，その値は湾口部の深み有無によって大きく異なり，深みの有る Case T1H2 よりも深みのない Case T2H2 の方が 1 桁ほど大きい。なお，ここでは示していないが深みを埋め込むことで湾口部の流速が大きくなることから，地形改変の効果だけをみるために地形が変化しても湾口流速が同じになるように条件を設定した実験も行っている。それによると，これまでの実験結果と同様に地形改変の効果が認められており，このことから湾口部の深みは渦度の輸送・減衰に大きく関与していることが分かる。

図－5 は，潮汐残差流エネルギーと平均渦度との関係を全ての実験ケースについて示したものである。潮汐残差流エネルギーは湾内の流動の強さを表す指標であり，村上（1998）が示した式に従い，平均渦度は 1 潮汐周期間の平均値で示した。なお図中の英数字 V1，V2，V3 は湾口流速の違いの実験を，S1，S2，S3 は水平スケールの違いの実験を示し，湾口部の流速の大きさは，V1>V2>V3 であり，現地換算した湾の水平スケールの大きさは，S1>S2>S3 である。図が示すように，湾内の潮汐残差流

表－2 実験ケース

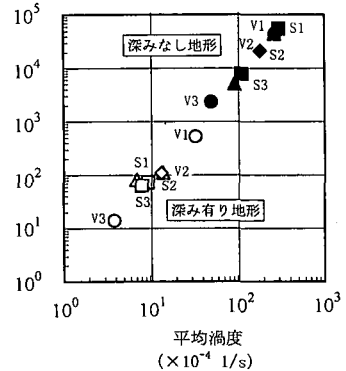
	湾口部の地形形状	湾内の水深 (cm)	湾外の水深 (cm)	潮汐の周期 (sec)	潮汐の振幅 (cm)
Case T1H1	深み有り	3.5	10.5	180	0.5
Case T1H2	深み有り	7.0	14.0	180	0.5
Case T1H3	深み有り	10.5	17.5	180	0.5
Case T1H4	深み有り	7.0	14.0	120	0.5
Case T1H5	深み有り	7.0	14.0	240	0.5
Case T1H6	深み有り	7.0	14.0	180	0.3
Case T1H7	深み有り	7.0	14.0	180	0.7
Case T2H1	深みなし	3.5	10.5	180	0.5
Case T2H2	深みなし	7.0	14.0	180	0.5
Case T2H3	深みなし	10.5	17.5	180	0.5
Case T2H4	深みなし	7.0	14.0	120	0.5
Case T2H5	深みなし	7.0	14.0	240	0.5
Case T2H6	深みなし	7.0	14.0	180	0.3
Case T2H7	深みなし	7.0	14.0	180	0.7

平均渦度 ($\times 10^{-4}$ 1/s)



図－4 湾内における平均渦度の時間変化

潮汐残差流エネルギー ($\times 10^{-4}$ cm²/s²)



図－5 潮汐残差流エネルギーと平均渦度との関係

エネルギーと平均渦度の値は，湾口部の流速が大きくなるほど大きくなっている。また潮汐残差流エネルギーと平均渦度は非常に強い相関を示し，湾口部の深みを埋め込むことで大きくなっている。地形改変による渦度の発生量は，湾口部の地形と流速に依存し，渦度の輸送・減衰に深みが関与している。

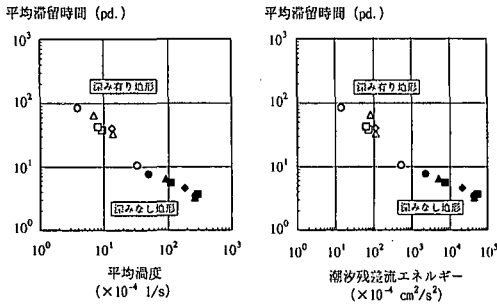


図-6 平均滞留時間と平均温度、潮汐残差流エネルギーの関係

図-6 は、平均滞留時間と平均温度、平均滞留時間と潮汐残差流エネルギーの関係を示したものである。なお、図の縦軸の時間単位 pd. は 1 潮汐周期を表わす。この平均滞留時間は、湾内に残留する浮標数の変化より求め、値が小さいほど海水交換が良いことを示す。図が示すように、湾内の平均温度が大きいほど、あるいは潮汐残差流エネルギーが大きいほど平均滞留時間の値は小さくなっている。

以上、地形改変は温度の発達、輸送、減衰の変化として現れ、この温度の変化の違いが潮汐残差流の大きさの違いとなり海水交換促進につながる。

5. 水平形状の違いによる地形改変の効果

表-1 の湾長、湾幅で示したように、現地には様々な大きさの湾が存在し、湾内の水質環境は閉鎖度指標が高いほど悪い。このような閉鎖度指標が高く、湾長、湾幅の水平形状の違う湾に対して地形改変の効果はどうなるのかを矩形湾の水槽実験により検討した。

5.1 実験方法

実験は、図-7 に示す矩形湾を平面水槽内に設置して行った。実験条件は現地のスケールを想定して決めた。湾内水深は 10 cm (現地換算 12 m)、潮汐振幅は 0.58 cm (現地換算 68 cm)、潮汐周期を 180 秒 (現地換算 12 時間 25 分、 M_2 潮) と固定し、操作パラメータとして湾幅 B 、湾長 L 、湾口幅 W を変化させて行った。この湾幅 B と湾長 L は、現地の地形形状の解析結果を参考にしてを決めた。検討した水平形状の変化を表す L/B の値は、0.5、1.0、1.5、2.0 の 4 段階、 W/L の値は、0.05、0.1、0.15 の 3 段階とし、湾口部の深みの規模は B と L が変わっても変えないで一定値とした。なお、実験で扱った湾幅の値を現地換算すると 2.7 km、5.4 km に、湾長は 2.7 km、5.4 km、8.1 km になり、表-1 に示した小内湾の規模に匹敵する。流況改善のための湾口部の深み埋め込みの規模は、図-7 に示すように湾内水深までとした。なお湾内全体の流況や海水交換は、湾内 20 cm 間隔に初期配置し

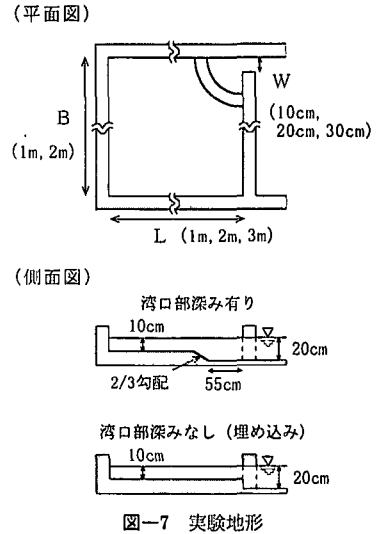


図-7 実験地形

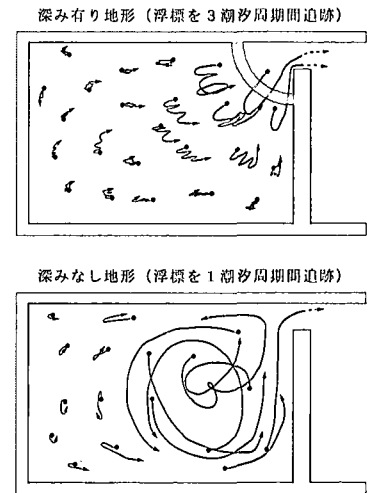


図-8 湾口部の深み有無による流跡の変化 ($L/B=1.5$)

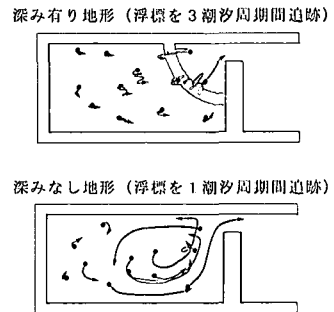


図-9 湾口部の深み有無による流跡の変化 ($L/B=2.0$)

た浮標の移動や湾内に残留する浮標個数により評価した。

5.2 実験結果と考察

図-8、9 は、一連の実験の中で水平形状の変化を表す

平均滞留時間 (pd.)

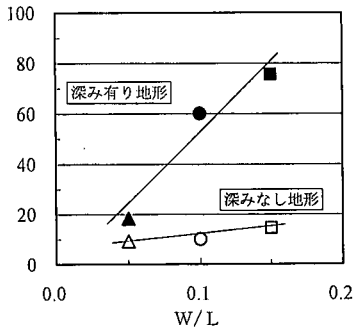


図-10 W/Lと平均滞留時間との関係

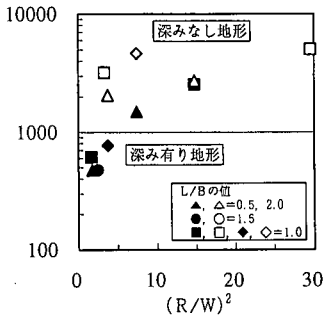
 海水交換量 ($\text{cm}^3/\text{pd.}$)


図-11 水平形状の異なる湾に対しての地形改変効果

L/B の値がそれぞれ 1.5, 2.0 の場合の実験結果であり、浮標の追跡により得られた流跡図を示したものである。これまでの実験結果と同様に地形改変の効果が認められるが湾全体には及んでいない。両図が示すように、地形改変によって形成される循環流の形状は、ほぼ円の形を呈している。地形改変を施した他の実験ケースでも、循環流の形は楕円形ではなく円形を示しており、湾幅と湾長の比が地形改変効果を規定する一つの要因であることが推論される。

図-10 は、 W/L と平均滞留時間との関係を示したものである。実験では湾幅と湾長を固定し湾口幅のみを変えているために、どの実験ケースもタイダルプリズムは等しくなっている。タイダルプリズムが等しい条件の中では、 W/L が小さくなるほど平均滞留時間の値は小さく、また地形改変の効果は W/L が大きくなるほど大きくなっている。

図-11 は、循環流を考慮して水平形状の異なる湾に対しての地形改変効果を海水交換量の形で示したものである。海水交換量はタイダルプリズムを平均滞留時間で割った値と定義し、図の横軸は Kashiwai (1984) が循環

流の分類に使用したパラメータ $(R/W)^2$ を用いた。ここで、 R はタイダルプリズムに等価な半円筒の半径を示す。図が示すように、湾の水平形状の要素が入っている $(R/W)^2$ の値が大きいほど海水交換量も大きく、地形改変することで海水交換量を増加させることができる。深み有り地形の場合、海水交換量と $(R/W)^2$ の間には良い相関が認められるが、深みなし地形ではみられない。これは、図-8, 9 でみてきたように L/B の値が 1 の場合が循環流の海水交換に対する効果が効率的であると思われる。以上、数 km から 10 km ほどの大きさを持つ小内湾においても地形改変の効果は認められた。

6. あとがき

本研究では、流況を制御して海域環境を修復する地形改変工法の現地への適用性を資料解析、現地観測、水槽実験により検討した。得られた成果を以下に要約する。

- ①湾口部に深みを持つ小内湾の閉鎖度指標と湾内外比の COD との間には正の相関関係が認められた。また徳山湾の奥部の底層では貧酸素の傾向が強く、水温成層が発達していた。
- ②地形改変は、渦度の発達、輸送、減衰の変化として現れ、この渦度の変化の違いが潮汐残差流の大きさの違いとなり海水交換促進につながる。
- ③地形改変によって形成される循環流の形状は、湾幅、湾長の水平形状の比が異なっても円の形を呈し、地形改変の効果は湾の水平形状の要素が入っている $(R/W)^2$ と海水交換量との関係で示した。

参考文献

- 西田幸夫 (1978): 全国海域利用計画への接近, 新しい海域利用技術便覧, pp. 80-111.
- 西野耕一・鳥居 薫 (1992): 2 次元 PTV における粒子追跡法, 第 10 回流体計測シンポジウム講演論文集, pp. 129-134.
- 兵庫県立水産試験場 (2000): 兵庫県立水産試験場事業報告, 平成 11 年度, pp. 125-146.
- 広島県水産試験場 (2000): 広島県水産試験場事業報告, 平成 11 年度, pp. 53-62.
- 村上和男 (1998): 閉鎖性内湾域の海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究, 港湾技研資料, No. 900, pp. 79-90.
- 山口県内海水産試験場 (2000): 山口県内海水産試験場報告, 平成 10 年度, pp. 150-171.
- 山崎宗広・宝田盛康・上嶋英機・朝田孝二 (1998): 湾口部地形改変による停滞性海域の流況改善に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1026-1030.
- 山崎宗広・上嶋英機・早川典生・村上和男 (2000): 成層化した閉鎖性内湾の海水交換促進技術に関する研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1151-1155.
- 和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場 (2000): 漁業海況予報事業結果報告書, 平成 11 年度, pp. 248-251.
- Kashiwai, M. (1984): Tidal residual circulation produced by a tidal vortex, J. Oceanogr. Soc. Japan, 40, pp. 279-294.