

徳山湾の環境改善のための現地調査と水理模型実験

山崎宗広* ・村上和男** ・松本英雄***
出路康夫**** ・森田真治***** ・和田 誠*****

著者らは、停滞域の流れを制御して海水交換を促進する技術として、湾口地形改変工法を提案し基礎水槽実験より検討してきた。基礎水槽実験では現象の理解を容易にするために実験条件の設定が限定的であり、またモデル矩形湾ではなく実海域において効果があるのか疑問が残る。本研究では、このことを明らかにするために徳山湾の現地調査と水理模型実験を行った。現地調査より、成層期だけ上層と下層の流れに違いがみられ、基礎水槽実験結果と一致した。水理模型実験より、徳山湾においても湾口地形改変工法が有効であることが分かった。この水理模型内の流れは、現地の混合期における流動と一致しており、水理模型実験結果の妥当性が確かめられた。

1. はじめに

瀬戸内海の閉鎖性海域では、広い範囲で貧酸素水塊の形成や赤潮の発生といった、水質環境問題が依然として存在している。この水質環境問題の原因は、排水規制などの努力にも拘わらず閉鎖性海域に流入する汚濁負荷量が、自浄作用や海水交換によって海域外にでていく量よりも多く、有機性の汚濁物質がその海域内に蓄積することにある。そして、その原因の主要なものとして、流れが遅く停滞域となっていることが多い。

著者ら (1998, 2000) は、この停滞域の流れを制御して海水交換を促進する技術として、湾口部の深みを埋め込む地形改変工法を提案し、矩形湾の基礎水槽実験より検討してきた。その結果、湾口部の地形改変工法は、冬期の混合期を想定した均一流体場や夏期の成層期を想定した二成層場においても湾口部での潮流を増大させて水平的な循環流を誘発し、湾内水全体の海水交換の改善に効果的な手段になることが分かった。また、徳山湾をモデル化した基礎水槽実験より、密度成層がない条件では上層も下層も同じような流速分布を示すのに対し、密度成層が存在すると上層の流れが下層の流れよりも大きくなることを見いだされ、上層の流れは密度成層が存在することにより海底地形の深みの影響を受けることが小さくなるという興味深い結果が得られた。

しかしながら、基礎水槽実験では現象の理解を容易にするために実験条件の設定が限定的であり、実海域での流れを再現しているのか、またモデル矩形湾ではなく実海域において本当に地形改変工法が海水交換促進に有効な手段になり得るのか、疑問が残る。そこで本研究では、徳山湾の水質環境改善を目的に、徳山湾の夏期の成層期と冬期の混合期に湾内の流動と水質調査を実施して基礎水槽実験結果の妥当性と水質環境を検討するとともに、

瀬戸内海の地形を再現した水理模型実験により、徳山湾の地形改変工法の適用性について検討した。

2. 徳山湾の流動・水質調査

現地調査は、夏期、冬期とも徳山湾内の流速・流向分布状況を水平・鉛直的に調べる ADCP による流動測定と、湾内から湾外にかけての水温、塩分、溶存酸素、COD 等の水質状況を調べる水質測定を実施した。

(1) 現地調査の内容

図-1 は、徳山湾の地形形状と調査地点を示したものである。徳山湾は湾口部が閉鎖的であり、湾の規模は湾長が約 9 km、湾幅が 4 km ほどあり、大津島と大島間および大津島と黒髪島間が主な開口部となっている。大津島と大島間の湾口部では、水深 35 m 強の深みがある。

夏期の成層期調査は、2002 年 8 月 25 日、冬期の混合期調査は、2003 年 1 月 19 日に実施した。両調査日とも大潮時にあたり、流動および水質の調査地点は、夏期および冬期観測とも同じ位置とした。

流動調査は、ADCP (RD 社製 WH 600 型) を用いて行った。流動測線は図-1 に示す湾内を横断する①~④

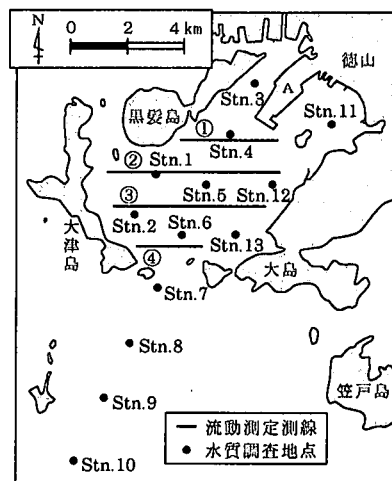


図-1 徳山湾の地形形状と調査地点

* 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 武蔵工業大学教授 工学部都市基盤工学科
*** 正会員 工修 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所
**** 中国地方整備局 宇野港湾事務所
***** 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所

の4測線であり、2隻の調査船を使って船速1~2ktで移動しながら観測を行った。調査は2時間毎に観測順序を決めて行い、夏期の場合は6回、冬期の場合は5回の約一潮汐間、実施した。

水質調査は、図-1に示すStn. 1~13の13測点において行った。調査項目は、透明度とクロロテック（アレック電子製ACL208-DK型）による表層から海底までの水温、塩分、濁度、クロロフィルおよび水質計（HydroLab社製MiniSonde）による溶存酸素を測定した。また表層（水面下1m）と下層（海底上1m）の2層における海水を採水して持ち帰り、「JIS K0102」計量方法によりCODと栄養塩（T-N、T-P）の分析を行った。

(2) 流動調査の結果と考察

図-2、図-3は、それぞれ夏期、冬期の調査より得られた、上げ潮期における湾内流速分布を示したものである。観測時間帯は、夏期、冬期ともほぼ同じ潮時から測定を開始している。なお冬期の観測では、ADCP測器が不調のため、湾口部の観測ラインのみ欠測となっている。

図-2に示した夏期の成層期における湾内の流動場を見ると、上げ潮期のため湾内へ流入する北流が卓越しているが、湾口部の東側で流出の流れもみられ渦の存在が確認できる。上層の水深2m層では、湾口部の強い流れが湾奥部まで到達し、湾奥部でも強い流れとなっている。一方、下層の水深10m層では、湾口部の強い流れが湾奥

部までは到達せず、湾中央部から湾奥部にかけて流れは弱く停滞している。このように成層期では、上層と下層の流れの大きさに違いがみられ、上層の方が流れは大きい。密度成層を取り入れた基礎水槽実験（山崎ら、2000）からも、この流動の違いを明らかにしており、基礎水槽実験結果の妥当性が確かめられた。なお、徳山湾は湾口部に深みを持つ湾であり、この上層の流れの違いは、密度成層が存在することにより海水の上下混合が弱くなり、上層では海底地形の深みの影響を受けることが小さくなったためだと考えられる。

次に、図-3に示した冬期の混合期における湾内の流動場を見ると、上げ潮期のため湾内へ流入する北流が卓越しているが、規模は小さいものの時計回りの循環流が読みとれ、湾奥部は流れが弱い。夏期の成層期の調査では、上層と下層の流れの違いがみられたが、冬期の混合期の調査ではみられない。上層、下層とも湾口部の強い流れは、湾奥部までは到達せず、湾中央部から湾奥部にかけて流れは弱く停滞している。この傾向も、前述の基礎水槽の実験結果と同様である。

(3) 水質調査の結果と考察

表-1は、代表地点における水質調査結果のまとめを示したものである。夏期においては、湾内から湾外にかけて水温成層が発達しているが、冬期ではみられない。なお1年前の2001年夏期の成層調査（山崎ら、2002）や、

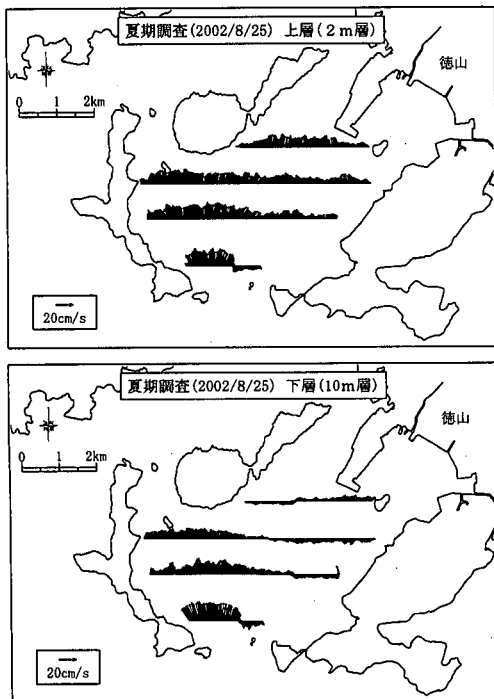


図-2 夏期の成層期における湾内流速分布（上げ潮期）

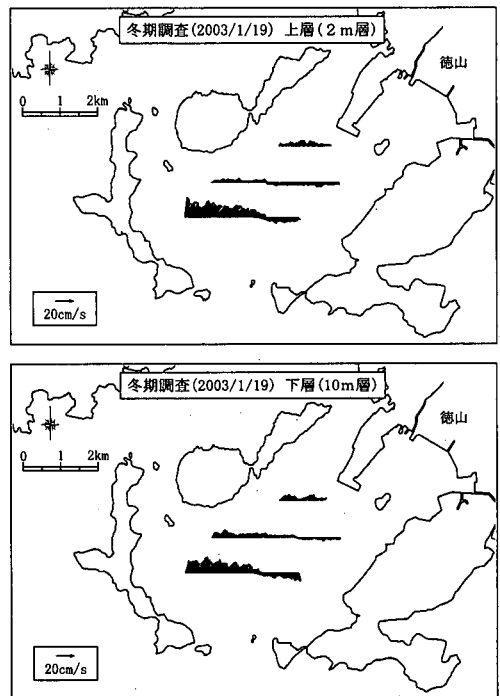
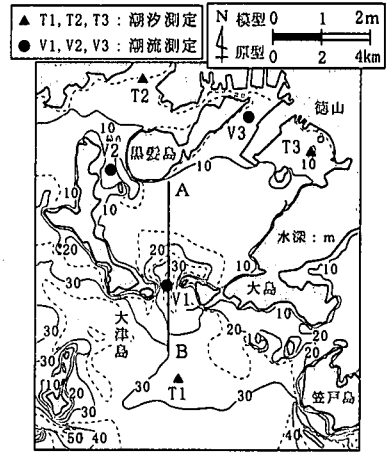


図-3 冬期の混合期における湾内流速分布（上げ潮期）

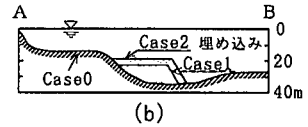
浅海定線の過去の水温データ(廣本ら, 1999)をみると、湾内から湾外にかけて表層と下層の水温差は約3~6℃もあり、本調査の2002年の夏期は弱い成層状態であったことが伺える。COD、T-N、T-Pの値は、湾外部 Stn. 10や湾口部 Stn. 7よりも湾奥部 Stn. 3の方が高く、また冬期よりも夏期の方が高い。夏期の湾奥部 Stn. 3の上層ではCODの値が3.1 mg/lと高く、下層では溶存酸素の値が小さい。なお湾奥部の他の測点 Stn. 11でも溶存酸素の値は3.2 mg/lとなっており、湾奥部の広い範囲で貧酸素化の傾向が伺え水質環境の悪いことが分かった。

表一 代表地点における水質調査結果のまとめ

		Stn. 3(湾奥部)		Stn. 7(湾口部)		Stn. 10(湾外部)	
		夏期	冬期	夏期	冬期	夏期	冬期
水温(℃)	表層	26.6	10.9	25.3	10.7	26.0	10.7
	下層	23.9	10.5	24.1	10.7	23.7	10.7
塩分(psu)	表層	31.7	33.3	33.0	33.7	32.9	33.7
	下層	33.0	33.6	33.0	33.7	33.1	33.7
溶存酸素(mg/l)	表層	7.2	8.7	6.4	7.8	6.5	7.7
	下層	3.8	7.8	5.5	7.6	5.0	7.7
COD(mg/l)	表層	3.1	2.1	1.8	1.7	1.7	1.9
	下層	2.7	2.1	1.8	1.7	1.8	1.8
T-N(mg/l)	表層	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
	下層	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
T-P(mg/l)	表層	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
	下層	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02



(a)



(b)

図一 徳山湾の水深と実験ケース

(a): 平面水深, (b): 縦断面水深

3. 徳山湾の環境改善に関する水理模型実験

徳山湾の現地調査より、湾奥部に停滞域の存在と水質環境の悪いことが明らかとなった。この徳山湾の水質環境を改善するためには、湾内の停滞域をなくし、湾外水との海水交換を促進させる策が必要となる。ここでは、基礎水槽実験より海水交換促進の効果が確かめられている湾口地形改変工法を、瀬戸内海大型水理模型内の徳山湾に適用して検討した。なお徳山湾の地形改変実験は、宝田ら(1987)の報告があるが、図一1のAに示した徳山南の大規模な埋立地は考慮されておらず、今回の実験では埋立によって湾内の流動変化が予想されることから埋立地を再現して実験を行った。

(1) 水理模型実験の内容

実験装置である瀬戸内海大型水理模型は、Froudeの相似則に従い、水平縮尺1/2000、鉛直縮尺1/159の歪み模型であり、海底地形は詳細な海図を基に製作されている(中国工業技術試験所, 1976)。実験は、潮汐を現地と同様に再現させるため、紀伊水道、豊後水道および響灘の3ヶ所の起潮装置に、瀬戸内海で卓越する半日周潮(M₂潮)を与えて行った。

図一4は、徳山湾の水深と実験ケースを示したものである。海水交換促進のための地形改変の実験は、大津島と大島間にある深みを埋めて、湾口水深を浅くすることをにした。湾口部の最大水深は、現況のCase 0で約35 m

(模型上の水深は22.0 cm)、Case 1で25 m(25 m以深を埋め込み、模型上の水深は15.7 cm)、Case 2で20 m(20 m以深を埋め込み、模型上の水深は12.6 cm)である。図に示す位置において潮汐・潮流の変化を調べた。潮汐の変化はサーボ式水位計(ケネック製SW-201型)、潮流の変化は二次元電磁流速計(アレック電子製ACM-250型)により測定した。湾内の流況変化は、水面に浮かべた浮標ボール(比重0.92、直径6 cm)の動きをビデオ撮影して評価した。また海水交換の評価は、湾内に浮標ボールを等間隔に配置し、評価領域内に残留する浮標数の変化より行った。

(2) 水理模型実験結果と考察

a) 湾口地形改変による潮汐・潮流の変化

表一2は、潮汐の調和解析より得られた各測点での基本周期成分の振幅と位相遅れの値を示したものである。この表をみると、湾口部の地形改変による顕著な振幅の変化や位相遅れはみられない。なお潮流については、湾口部直上の Stn. V1の位置において、地形改変を施すことで潮流の増大がみられる。その潮流の増加は、Case 1

表一2 基本周期成分の潮汐の調和定数

	Case 0 (現況地形)		Case 1 (25 m 埋め込み)		Case 2 (20 m 埋め込み)	
	振幅 (mm)	位相 (deg.)	振幅 (mm)	位相 (deg.)	振幅 (mm)	位相 (deg.)
Stn. T1	5.2	0.7	5.3	-0.3	5.3	1.7
Stn. T2	5.3	1.9	5.4	1.3	5.5	0.7
Stn. T3	5.5	-1.0	5.4	2.1	5.4	0.4

よりも湾口部の水深が浅い Case 2 の方が大きい。他の測定位置では、湾口部の地形改変による顕著な潮流の変化はみられなかった。このような潮汐や潮流の結果は、基礎水槽実験の結果と同様である（山崎ら, 1997）。

b) 湾口地形改変による湾内の流況変化

図-5 は、各実験ケースでの流跡図を示したものである。この流跡図は、浮標ボールを 3 潮汐周期間に渡って追跡し、上げ潮後の憩流時をスタートとして●印で示したものである。現況地形 Case 0 の場合、湾口部では潮汐に対応した流れが、また湾内には流れの強さは小さいものの反時計回りの循環流がみられる。しかし、湾奥部では 3 潮汐周期間経っても浮標ボールは殆ど動かず停滞している。一方、湾口部の水深を操作した Case 1, 2 の場合、Case 0 に比べて湾内の流れや循環流の強さ、規模も大きくなっており、その強さは、Case 1 よりも水深の浅い Case 2 の方が大きい。また地形改変することで湾奥部の停滞域を解消している。なお現況地形 Case 0 における流れは、現地調査で示した冬期の混合期における流動結果と良く一致している。このことから、水理模型実験結果の妥当性が確かめられた。

図-6 は、浮標ボールの追跡より得られた 1 潮汐周期間の浮標の変位（ここでは潮汐残差流と呼ぶ）を示したものである。現況地形 Case 0 の湾奥部では、潮汐残差流が小さく、海水の停滞性が伺える。これに対し、湾口部の深みを埋め込んだ Case 1, 2 では、潮汐残差流が大きくなっており、地形改変は海水交換促進につながるこ

が分かる。

c) 湾口地形改変による海水交換の変化

海水交換の評価は、湾内全域と湾奥部を対象に別々に行った。図-7 は、浮標ボールの初期投入位置を示したものである。湾奥部だけを評価するために、図中の直線で示した①-②ラインより内側を湾奥部と定義し、▲印の位置に浮標ボール 35 個を配置した。湾内全域の評価は、これに●印で示した位置も含め全体で 164 個の浮標ボールを使用した。

図-8, 図-9 は、それぞれ湾内全域、湾奥部における浮標ボールの残留率変化を示したものである。図の浮標残留率は投入量で正規化して示しており、横軸の時間単位 pd は 1 潮汐周期を表す。湾内全域の浮標残留率の時間変化をみると、地形改変を施すことで残留率の値は小さくなっており、湾口部の水深が浅い方が残留率の値は小さい。また、このことは湾奥部の海域においてもいえる。図-6 に示した潮汐残差流の変化は、湾内に残留する浮標数の減衰率の値でも分かるように、湾内の海水交換促進に反映されている。

表-3 は、浮標残留率変化を $\exp(-at)$ 、(t は潮汐周期, a は定数) で近似し、 $0 \sim \infty$ まで積分して得られる平均滞留時間の値と近似曲線より求めた 50% 交換時間の値を示したものである。徳山湾における湾口部の地形改変は、湾内水と湾外水との海水交換を促進させるだけでなく、湾奥部の海水交換も促進できることが平均滞留時間の値から分かる。湾内全域に対する深み埋め込みの海水交換

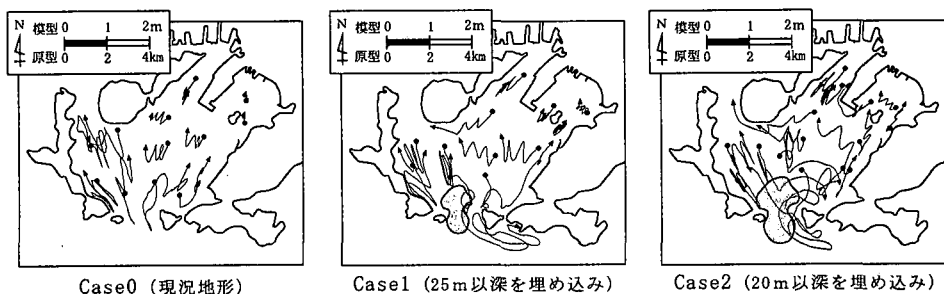


図-5 地形改変による流跡の変化（浮標を 3 潮汐周期間追跡）

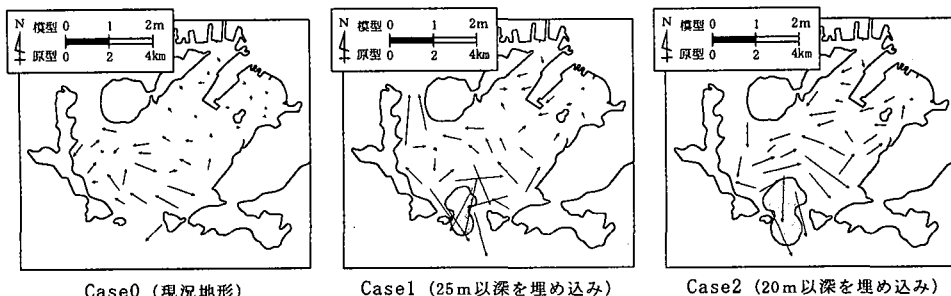
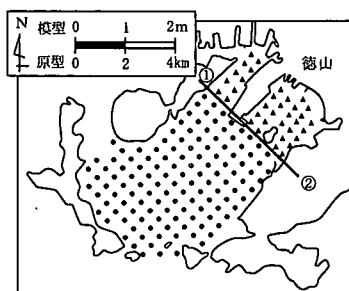


図-6 地形改変による潮汐残差流の変化



湾奥部：▲印，浮標35個
湾内全域：●+▲印，浮標164個

図-7 浮標ボールの初期配置図

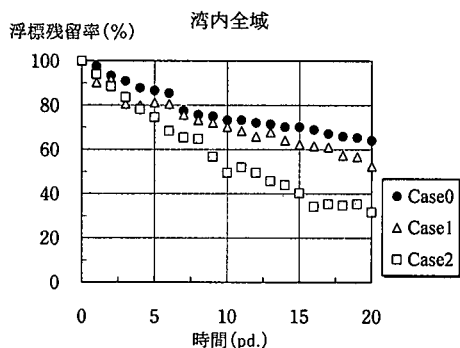


図-8 湾内全域における浮標残留率の時間変化

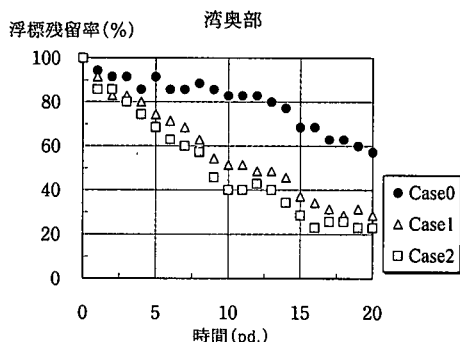


図-9 湾奥部における浮標残留率の時間変化

の改善効果は、平均滞留時間が現況地形 Case 0 に対し 40 潮汐周期、地形改変 Case 1, 2 の順に対し 31, 17 潮汐周期と評価される。また湾奥部の領域に対しては、平均滞留時間の値が Case 0, 1, 2 の順に 43, 16, 13 潮汐周期と評価され、Case 2 では湾奥部の滞留時間を 1/3 に減少させている。

4. おわりに

著者らは、停滞域の流れを制御して海水交換を促進する技術として、湾口地形改変工法を提案し基礎水槽実験より検討してきた。しかしながら、基礎水槽実験では現象の理解を容易にするために実験条件の設定が限定的で

表-3 浮標より求めた平均滞留時間と 50%交換時間

	湾内全域		湾奥部	
	平均滞留時間 (pd.)	50%交換時間 (pd.)	平均滞留時間 (pd.)	50%交換時間 (pd.)
Case 0	40.0	27.7	42.5	29.5
Case 1	31.0	21.5	15.8	11.0
Case 2	16.7	11.6	12.7	8.8

あり、実海域での流れを再現しているのか、またモデル矩形湾ではなく実海域において地形改変工法が海水交換促進に有効な手段になり得るのか、疑問が残る。本研究では、このことを明らかにするために、徳山湾の現地調査と水理模型実験を行った。得られた成果を以下に要約する。

・徳山湾の現地調査より、

①夏期の上げ潮期における上層では、湾口部の強い流れが湾奥部まで到達して強い流れとなるが、下層では湾奥部まで到達せず流れは弱く停滞している。この成層期による流動の違いは、密度成層を取り入れた基礎水槽実験結果と一致しており、基礎水槽実験結果の妥当性が確かめられた。

②冬期の上げ潮期における上層と下層の流動の大きさに違いはみられず、湾奥部の流れは弱く停滞している。

・徳山湾の水理模型実験より、

③徳山湾の地形においても湾口部の地形改変は、湾内の流れや循環流を大きくして湾奥部の停滞域を解消し、海水交換を促進する。

④現況地形 Case 0 の湾内の流れは、現地の混合期における流動と良く一致しており、水理模型実験結果の妥当性が確かめられた。

以上、徳山湾の環境改善に地形改変工法は有効な手段になるものと思われる。

参考文献

- 宝田盛康・上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・今村 均 (1987): 湾内水停滞性の制御・改善の実験的研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 666-669.
- 中国工業技術試験所 (1976): 瀬戸内海大型水理模型一その施設と設備一, 中国工業技術試験所大型水理模型資料, 94 p.
- 廣本正和・藤村治夫 (1999): 浅海定線調査, 山口県内海水産試験場報告, 第 27 号, pp. 85-110.
- 山崎宗広・宝田盛康・上嶋英機 (1997): 湾内停滞性海域の海水交換促進に関する実験的研究, 中国工業技術研究所報告, No. 49, pp. 1-9.
- 山崎宗広・宝田盛康・上嶋英機・朝佐孝二 (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.
- 山崎宗広・村上和男・早川典生 (2002): 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, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1271-1275.