

直立型海岸構造物を利用した浅場創出事業

村上仁士¹・上月康則²・三好順也³・野田 徹⁴・久本忠則⁵
伊藤春樹⁴・岩村俊平⁶・北野倫生⁷・山本秀一⁸

港湾事業では、生物生息場の機能や水質浄化機能の強化に配慮することが望まれており、各地で環境保全・修復技術の開発が進められている。著者らは、防波堤や護岸などに使用されている直立型構造物の生物生息機能や物質循環機能の乏しさに着目し、エコポート共同研究会を発足させ構造物内に浅場を創出する技術の研究・開発を行ってきた。その結果、三島川之江港で直立型構造物を利用した浅場創出の事業化に至ったため、今後の環境修復技術の開発や事業化に資することを目的として、実証実験での順応的対応を含む研究開発と事業化に向けたプロセス、およびそこで得られた知見や今後の課題を整理した。

1. 緒 論

近年、港湾事業では、干潟や藻場等の再生の他、構造物を整備する際にも生物の生息のしやすさや水質浄化を強化する機能に配慮することが望まれており、各地で環境保全・修復技術の開発が進められている(例えば、横山ら, 2003; 田中ら, 2004)。

著者らは、直立型構造物の生物生息場としての機能や物質循環機能の乏しさに着目し、生態系工学的アプローチにより直立型構造物に浅場を創出する技術の開発を約 8 年間にわたって行ってきた結果(例えば、上月, 2002)、本技術を事業化することができた。研究開発と事業化にあたっては、「エコポート共同研究会」を設置し、関係者の意見を反映させつつ進めていったことも、直立型構造物を利用した浅場の創出技術の事業化につながったことに寄与したと思われる。

本稿では、今後の環境修復技術の開発や事業化に資することを目的として、実証実験での順応的対応を含む研究開発と事業化に向けたプロセス、およびそこで得られた知見や今後の課題を整理した。

2. 研究開発のプロセス

(1) 研究開発から事業化への取り組み

研究開発に際して、国土交通省四国地方整備局(旧運

輸省第三港湾建設局)、徳島県、徳島大学の研究メンバーを中心として 1998 年 5 月に「エコポート共同研究会」を発足させ、2005 年 3 月までに合計 14 回開催した。以下に、港湾環境に関係するおもな施策の動向と当研究会での議論の内容を概説する(表-1)。

国土交通省(旧運輸省)では、環境基本法の制定(1993)を受け、環境と共生する港湾—エコポート—(エコポート政策, 1994)を策定している。本施策の特徴は、物質循環のマクロバランスを把握すること、COD のみでなく溶存酸素(以下、DO という)にも着目することなど、従来の対策に加えて生態系に配慮した環境改善技術の必要性が示されている点にあり、環境と共生する港湾づくりを推進するための指針となった。これを契機として、浚渫土砂を有効活用した海浜や浅場の造成などが各地で行われるようになった。

その後、新・生物多様性国家戦略(2002)や自然再生推進法(2003)が制定され、生物多様性を確保することや生態系に配慮することが一層求められるようになった。国土交通省ではこれらを背景に、港湾環境の開発・利用と環境の保全・再生・創出を車の両輪としてとらえ、港湾のグリーン化(2005)を図ることを示している。今後、港湾の持続可能な発展を遂げるためには、失われた自然環境を少しでも取り戻すことや港湾のあらゆる機能に環境配慮を取り込んで、環境の保全・再生・創出を積極的に図ることが求められている。

エコポート共同研究会では、1998 年から閉鎖性海域の水質、底質を改善するために、閉鎖性海域で一般的に生息している底生生物を対象として、それらの底質浄化機能の定量化や生息場に関する研究を開始した。さらに、生物と港湾構造物との共生および持続可能な発展に鑑み、港湾の生物多様性および食物連鎖を介した物質循環の修復を目的として、2000 年から港湾をとりまく直立型構造物を利用した浅場造成技術の研究開発に着手した。その後、後述する小規模な実証構造物を用いた実証実験などを経て、2003 年には事業化の検討に至った。

-
- | | | | |
|---|-------|----------|----------------------------|
| 1 | フェロー | 工 博 | 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 教授 |
| 2 | 正 会 員 | 博(工) | 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 助教授 |
| 3 | 正 会 員 | 博(工) | (独法)産業技術総合研究所 |
| 4 | | | 国土交通省四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 |
| 5 | | | 国土交通省四国地方整備局 小松島港湾・空港整備事務所 |
| 6 | 正 会 員 | 修(工) | (株)エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部 |
| 7 | 正 会 員 | 博(工) | (株)エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部 |
| 8 | 正 会 員 | 博(生物資源工) | (株)エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部 |

表-1 環境施策の動向と当研究会での議論の内容

	海域環境に関する法律等	施策の方向性	施策の例	研究会での議論の内容
1990年代	環境基本法(93), 環境共生する港湾-エコポート(94), 環境影響評価法(97)	・環境の保全に配慮した港湾の整備等 ・持続可能な港湾整備	・水質(COD)の改善, 流入負荷削減, 覆砂・浚渫 ・浚渫土砂を活用した海浜等の造成(シーブルー事業)	・底生生物を活用した底質浄化(98~) ・直立型構造物を利用した浅場造成技術の開発: 生物多様性, 物質循環の修復(00~)
2000年代	港湾法改正(00), 新・生物多様性国家戦略(02), 自然再生推進法(03), 港湾行政のグリーン化(05)	・生物多様性の確保 ・環境配慮(保全・再生・創造等)の標準化	・環境配慮型構造物, 干潟, 藻場, 浅場造成技術の研究開発	・同技術の事業化の検討(03~)

(2) 環境保全上での直立型構造物の課題

直立型構造物と自然岩礁の環境特性(表-2)をみると, 自然岩礁に比べて波浪条件は弱く, 基盤の勾配は急かつ単純である。自然岩礁と多くの直立型構造物で囲まれた港湾における懸濁態有機物を起点とした物質循環を比較すると, 図-1のa過程ではムラサキガイやマガキなどの懸濁物食動物を主体とする付着動物が多く, それらの産する糞・擬糞, 死骸による海底への負荷が多いことが特徴である。矢持ら(1995)は, 直立壁面から脱落したムラサキガイの有機物負荷が, 海域環境の悪化の一因になっていると報告している。このため, 底層付近では夏季を中心として貧酸素化が進行し, 底生生物相が貧弱になっていることが多い。一方, 自然岩礁は基盤が緩く複雑なため, 沈降した糞・擬糞は, 豊富な堆積物食動物などで構成されるデトリタス食物連鎖の中で分解されるほか, 波浪や乱流の影響で再懸濁し, 再び付着動物の餌となるといった物質循環が成立している(b過程)。

表-2 直立型構造物の環境特性(栗原(1998)を元に作成)

環境特性		区分	自然岩礁	直立型構造物
波浪条件	強		●	
	弱			●
基盤の勾配	急		●	●
	緩		●	
基盤の表面	複雑		●	
	単純			●

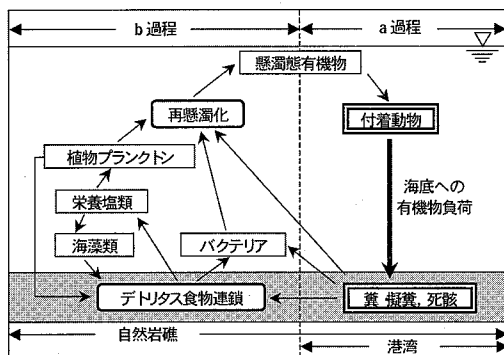


図-1 自然岩礁と港湾における付着動物の摂食・排泄をめぐる諸関係(栗原(1998)を一部改変)

これらのことから, 海域環境からみた直立型構造物の課題の一つとして, DOが豊富で, 付着動物の糞・擬糞が波浪や乱流の影響を受けて再懸濁する水深帯に底生生物の生息場となる浅場を設けることが重要であると考えた。

(3) 港湾での浅場創出技術の環境保全・修復目標

本研究で提案する浅場の特徴は, 貧酸素水塊の影響が及ぶ可能性の低い浅い水深帯を抽出し, 直立型構造物の内部に底生生物の生息可能な浅場を設ける点にある。構造物内の直立壁面に生息する懸濁物食動物の糞や死骸は, 本技術によって創出されたDOの豊富な平坦部で, 自然加入した底生生物に摂餌される。また, 魚介類による有機物の系外流出を期待する。つまり, 生物の生息場を設けて自律的に物質循環を促すことで, 図-1にも示した付着動物由来の海底への有機物負荷を減少させ, 環境の保全・修復を図ることが本技術の目標である(図-2)。

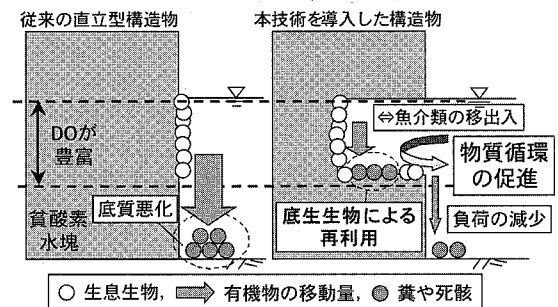


図-2 本技術の目標: 断面図

3. 実証実験

(1) 港湾での仮説検証実験

技術の目標で示した仮説を検証するため, 徳島小松島港の沖洲地区(水深C.D.L. -4m)に, それぞれC.D.L. ±0m, -2mの平坦部を持つ, 高さ6.5m, 幅1.65m, 奥行き3.7mの実証構造物を作成し, 設置した(図-3)。前面の直立部分と平坦部には, 生物の生息を促すためφ15cm×30cmのポーラスコンクリート供試体を壁状に設置した。さらに1999年12月から2005年2月にかけて, 実証構造物および対照区の既設直立型構造物を対象として, モニタリング調査を行った。具体的には, 平坦部で底生生物の生息に必要なDOが確保され

ているか、本技術の目標である付着動物由来の有機物の削減効果が得られているか、多様な生物種や対象海域で特徴的な大型生物が本技術で造成した浅場で生息するようになるかを確認するため、それぞれ実証構造物平坦部での DO の連続観測調査（アレック電子 ADO8M-6）、各構造物前面 C. D. L. -2 m での沈降物調査および生物調査を行った（例えば、Kurata ら、2001；倉田ら、2001）。本稿では重要な課題が抽出された C. D. L. -2 m のパターンを中心に示す。

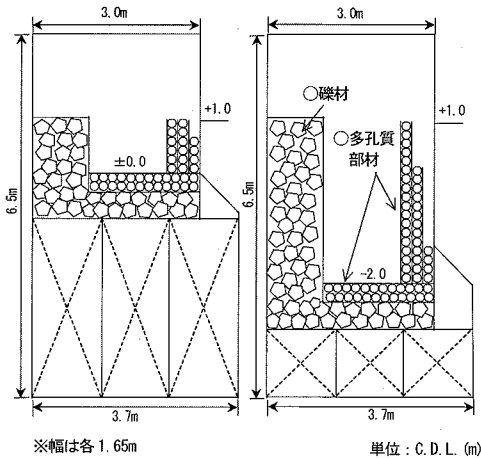


図-3 実証構造物：断面図

モニタリング調査結果の一例として、沈降物調査の結果を図-4 に示す。沈降物量と沈降物の POC 濃度を乗じて求めた構造物前面への 1 日の単位面積当たりにおける POC 負荷量は、C. D. L. -2 m のタイプの実証構造物で直立型構造物よりも平均 13 % 程度低く、削減効果が確認できた。特に生物活性が高い夏季にはその効果が大きく平均 25 % 程度の削減効果を示し、仮説を支持する結果が得られた。なお、C. D. L. -2 m のタイプの浅場では、マハゼやマナマコなどの大型底生生物が生息していたことから、生物生息場としても有効に機能していることが確認された。

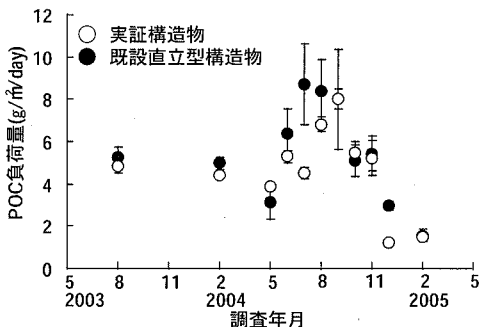


図-4 構造物前面への POC 負荷量 (mean ± SE)

(2) 事業化の際の留意点

実証構造物内での DO の連続観測調査の結果、DO は底生生物の生存可能な最低濃度の 2.9 mg/l (日本水産資源保護協会、2000) をたびたび下回っていた (図-5)。また、C. D. L. -2 m の平坦部における底生生物の湿重量は、C. D. L. -4 m の港内の海底に比べると多かった (図-6) もの、設置年数が経過するにしたがって減少した。これは、DO が低かったことに加えて、平坦部の堆積物量が増加し、堆積物中の AVS (酸揮発性硫化物濃度) の値が港内の海底の堆積物と同程度か上回る程度に高く嫌気化した (倉田ら、2004) ことなどが原因と考えられる。このことから、「①平坦部の水深は、多様な底生生物が生息可能な DO の目安を立てて設定する必要がある」ことがわかった。

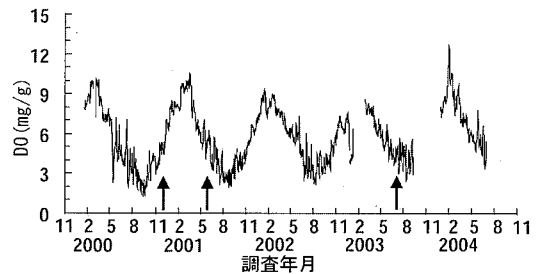


図-5 実証構造物内 (C.D.L.-2m) の DO の経年変化

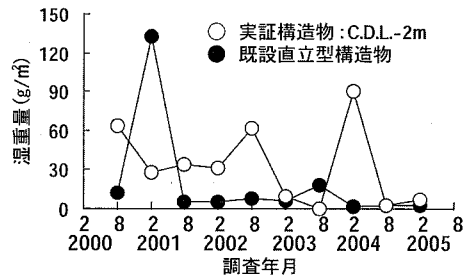


図-6 底生生物湿重量の経年変化

なお、C. D. L. -2 m のパターンでは、図-3 に示す直立部の多孔質部材に多くの付着動物が生息しており、これらの呼吸などに伴う酸素消費が構造物内部の貧酸素化を促進していると考えられた。このため、貧酸素化の抑制を目的として、直立部の多孔質部材を一部撤去する工事と背後の礫材を撤去する工事を 2000 年 12 月、2001 年 6 月、2003 年 7 月に行った。しかしながら、図-5 に示すとおり 2000 年の夏季に比べると DO は増加したものの、依然として 2.9 mg/l を下回ることがあった。このことから、「②懸濁物量が多く懸濁物食動物が多い海域では、直立部に生物が多く生息しすぎると平坦部付近の貧酸素化が進行するため、開放的にすることが重要である」ことがわかった。

尼崎港では、既設直立型構造物にも本技術が適用できるように応用した「取り付け型」の形状を採用して、構造物前面への有機物負荷量の削減効果などのモニタリング調査を行っている(上嶋, 2003; 三好ら, 2004)。対象海域は塩分が10~30 psu 程度と大きく変動する環境であり、実証実験を行った徳島小松島港と比較すると、さらに有機汚濁が進んだ海域である。夏季には塩分躍層が生じ、浅い水深まで貧酸素水塊の影響が及ぶ。ここで作成した実証構造物(図-7)では、徳島小松島港での実証実験から得られた知見に基づき、事前にDOの鉛直分布を調査し、DOが3.5 mg/lを上回ることを期待して平坦部をC.D.L. -0.5 m, -1.0 m, -1.5 mに設置するとともに構造物前面を開放系にしている。また、貧酸素水塊の影響を柔軟に回避することと底生生物が移動できることを期待して、異なる水深帯の平坦部を連続させている。

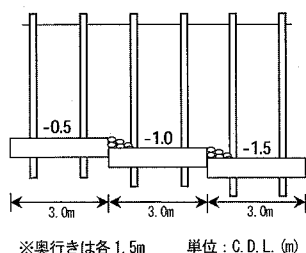


図-7 実証構造物：取り付け型，正面図(上嶋, 2003)

モニタリング調査の結果、C.D.L. -1.0 m 以深では、DOが3.5 mg/lを下回ることがあった。しかしながら、平坦部の水深に変化を持たせることで、底生生物の生息場としての機能も変化することが確認された(図-8)。つまり、「③貧酸素化しない水深帯で異なる水深の平坦部を設けることが有効である」ことが示唆された。

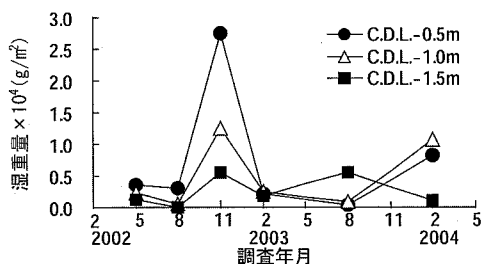


図-8 底生生物湿重量の経年変化：取り付け型

4. 事業化

(1) 平坦部設置水深の設定と構造物の設計

実証実験から得られた事業化に向けた留意点を踏まえ、防波堤の延伸計画があった三島川之江港の金子地区防波

堤を対象として、本技術の事業化を目的とした検討を行った(水谷ら, 2005)。三島川之江港は、燧灘の奥部に位置し、瀬戸内海でも比較的閉鎖性の強い海域である。事前調査の結果から、陸水や河川水の影響による塩分低下は顕著ではないものの、静穏で水温躍層が発達しやすく夏季には貧酸素化することがわかったため、本技術を導入することの有効性が高いと考えた。対象構造物は、ケーソン式直立堤であったことや周辺では航行船舶が多いことから、徳島小松島港での実証実験と同様の「組み込み型」を採用し、遊水室内部に浅場を設けることにした。

三島川之江港で、本技術に期待する生物生息場や構造物前面への有機物負荷量の低減機能が十分に発揮されるような平坦部の水深を求めるため、防波堤の既設構造物近傍を対象として事前調査を行った。得られたデータに基づき、3. 実証実験で得られた①から③の留意点に対してそれぞれ次のように対応した。

留意点①：夏季の約40日間にわたる鉛直方向の水温の連続観測を行ったところ、C.D.L. -4 m 付近で水温躍層が発達することがわかった。平坦部に求めるDOの目安としては、水産用水基準で示されている「底生生物の生息状況に変化を引き起こす臨界濃度：4.3 mg/l」(日本水産資源保護協会, 2000)を参考に5.0 mg/lを採用した。さらに、定期的に行ったDOの鉛直分布の結果から、C.D.L. -4 m 以浅においてDOの目安が満たされていたため、C.D.L. -4 m を平坦部設置水深の下限水深とした。

留意点②：直立面に実証実験と同様の多孔質部材を用いて付着生物の生息を促進しつつ、多孔質部材を遊水室の奥部に設置することで開口部を開放的にし、内部の貧酸素化が抑制されることを期待した。

留意点③：C.D.L. -4 m を平坦部設置の下限水深として、さらに海底に有機物負荷を与える付着生物の湿重量の合計がC.D.L. -2 m 以浅で壁面全体の約60%，C.D.L. -4 m 以浅で約80%であったことを考慮してC.D.

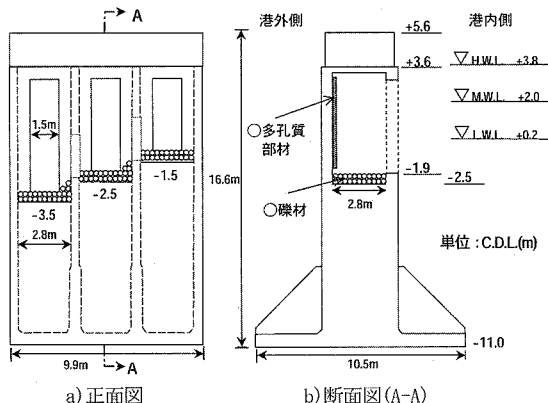


図-9 事業化された構造物(水谷ら, 2005)

L. 2~4 m の範囲に 3 段階の平坦部を設置することにした。

図-9 に実証実験から得られた留意点と事業化に関する検討結果を踏まえ、直立型構造物に導入した本技術の状況を示す。

なお、平坦部の設置水深については、構造物の沈下や DO の変動を考慮して 0.5 m ずつ嵩上げた。2005 年 12 月に本構造物を設置（事業規模 100 m：構造物の幅約 10 m×10 函）し、2006 年 2 月から表-3 に示す評価の視点でモニタリング調査を開始した。

表-3 技術の評価項目とその視点

評価項目	評価の視点
DO(連続観測)	目安とする DO が平坦部で満足されること
POC 負荷量 (沈降物調査)	構造物前面海底への有機物負荷量が、本技術を適用した構造物で既設構造物よりも少ないこと
生物相(生物相調査)	平坦部の底生生物の種類と湿重量が、既設構造物の前面海底よりも多いこと 期待する指標生物が浅場に確認されること

(2) 今後の課題

以下に、今後の課題を示す。

- ・ 今後は、本技術に期待した効果が得られたかどうか、また本技術を介した生態系が自律安定したかどうかを見極めるため、モニタリング調査を行って検証する予定である。後者については、桑江（2005）が指摘するように、造成された浅場での各種パラメータが近傍の既設構造物や目標となる自然岩礁でも起こりうる変動パターンを示しているかどうかを見極めることが重要と考えられる。なお、新たな課題が生じた場合には、今後の事業に反映し技術の精度を高めていく必要がある。
- ・ 環境配慮型事業を展開する際に、地域住民等との合意形成が不可欠となっているものの、住民の港湾環境施策への関心が高いとは言えない状況にある。本研究では、事業化の段階で住民が参加することは無かったものの、まず研究の内容や海域環境への関心を高めることが重要と考え、実証構造物や関連の施設を常時見学できるようにした。また環境学習会（みなとサマースクール）を継続的に開催して、本技術や海域環境に関する知識の普及に努めてきた結果、様々な意見が聴取できた。今後は、このような活動を推進しつつ、本技術を他の海域で適用する際に、地域住民等の意見を事業に反映させていく必要がある。

5. 結 論

小規模な実証構造物を用いた仮説—検証—改良の研究開発過程を経て課題を抽出し、直立型構造物を利用した浅場創出技術を事業化することができた。事業化できた

背景には、研究開発の当初から関係者で構成される研究会を継続的に開催して議論を行い、港湾海域環境の課題や解決方法に関する認識を共有してきたことなどが重要な役割を果たしたと考えられる。

今後は期待される効果の検証や生態系の自律安定を見極めるためのモニタリング調査を継続し、同様の研究会で技術の改良に関する議論を進めたいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、エコポート共同研究会にご参加頂いた徳島大学工学部建設工学科 水口裕之教授、島根大学汽水域研究センター 倉田健悟助教授、徳島県から多大なご協力を頂いた。また、尼崎港での実証実験については、環境省平成 13 年度環境技術開発等推進事業として財団法人エメックスセンターの支援を受けて行われたものである。ここに記して、関係者各位に深く感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 上嶋英機(2003)：閉鎖性海域における環境修復技術の効果検証と最適技術のパッケージ化，土木学会論文集，No. 741/Ⅱ-28，pp. 95-100.
- 倉田健悟・上月康則・山本秀一・岩村俊平・西村達也・村上仁士・水口裕之・笹山博(2001)：閉鎖性内湾における懸濁物の物質循環を活性化させる実験構造物の評価，環境工学研究論文集，第 33 巻，pp. 367-375.
- 倉田健悟・上月康則・村上仁士・水谷雅裕・森正次・北野倫生・岩村俊平(2004)：港湾における生態系の修復技術～徳島県小松島港で行われた実証実験を例に～，土木学会論文集，No. 755/Ⅷ-30，pp. 95-104.
- 栗原 康(1998)：海岸と港湾における環境保全のための生態学，土木学会誌，Vol. 83，pp. 26-28.
- 桑江朝比呂(2005)：造成された干潟生態系の発達過程と自律安定性，土木学会論文集，No. 790/Ⅶ-35，pp. 25-34.
- 上月康則(2002)：自立的な沿岸域の“自然再生”を促す海岸構造物の開発—生態系工学的アプローチによる海のピオトープづくり—，水，Vol. 44，No. 9，pp. 65-72.
- 田中ゆう子・岡村知忠・岩本裕之・鈴木秀男(2004)：東京湾の護岸部における小規模な生物生息場の創出に関する研究，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 1206-1210.
- 日本水産資源保護協会(2000)：水産用水基準(2000 年版)，p. 21.
- 水谷雅裕・上月康則・三好順也・村上仁士・石本健治・岩村俊平(2005)：ケーソンの遊水室に人工浅場を創出する際の生物的設計条件，海洋開発論文集，第 21 巻，pp. 707-712.
- 三好順也・上月康則・森正次・亀田大悟・矢間北斗・倉田健悟・村上仁士(2004)：岸壁付帯式テラス型構造物によるムラサキガイ由来の汚濁負荷削減効果，海洋開発論文集，第 20 巻，pp. 1061-1066.
- 矢持 進・有山啓之・日下部敬之・佐野雅基・鍋島靖信・睦谷一馬・唐沢恒夫(1995)：人工護岸構造物の優占生物が大阪湾沿岸域の富栄養化に及ぼす影響 1. 垂直護岸でのムラサキガイの成長と脱落，海の研究，Vol. 4，No. 1，pp. 9-18.
- 横山隆司・小國嘉之・藤原吉美・中原紘之(2003)：環境配慮型岸壁に形成される生物群集構造の評価，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 1211-1215.
- Kurata K., Y. Kozuki, S. Iwamura, H. Sasayama, H. Murakami (2001): Development of a New Type of Breakwater for the Environmental Restoration, PACON2001, p. 64.