

# エコシステム式海域環境保全工法を導入した 直立構造物の環境配慮機能の評価

Evaluation on the Environmental Restoration Efforts of the Artificial  
Shoal installed inside of the Upright Breakwater

村上仁士<sup>1</sup>・水口裕之<sup>2</sup>・上月康則<sup>3</sup>・伊福 誠<sup>4</sup>・野田 巖<sup>5</sup>・岩村俊平<sup>6</sup>・山本秀一<sup>7</sup>

Hitoshi MURAKAMI, Hiroyuki MIZUGUCHI, Yasunori KOZUKI  
Makoto IFUKU, Shunpei IWAMURA and Hidekazu YAMAMOTO

The artificial shoal area on the basis of ecosystem engineering has been applied to the breakwater newly established at Mishima-Kawanoe Port, in Ehime Prefecture. The objective of this study is to evaluate how the target indicators established during the planning stage is achieved and to obtain ideas adopting to other environmental restoration projects relevant to port structure construction in future. The evaluation points of the ecosystem function are, 1) Index species appearing on the artificial shoal, 2) Reduction of organic carbon loaded from attached animals by various organisms activities. As a result, it is suggested that the ecosystem is currently functioning well in the artificial shoal. Additionally, adaptive management concepts in developing the environmental restoration facilities are proposed.

## 1. 緒 論

我が国では、高度経済成長期に建設された港湾、海岸、漁港施設の多くが老朽化してきている。そのため今後加速度的に必要性能が保持できない構造物が増加していくと予測され(山内ら, 2006), 近々全国でそれらを改修, 再建設すべき時期が到来する。その際には, 港湾行政のグリーン化(2005)他にも示されているように, 港湾機能, 防災機能などを満足したうえで可能な限り生態系に配慮した工法を採用することが望ましい(上月, 2002)。

このような背景のもと, 環境配慮型の構造物の研究・開発が各地で行われてきている。事業化段階で具体的な成果が確認できた例としては, 緩傾斜護岸(例えば, 阪上ら, 2003)や潜堤付防波堤(中泉ら, 2004)など岩礁生態系に関連する工法があげられる。これらは主に海藻類の生育場に主眼を置いた生態系の創出技術であり, 優占種の遷移状況からみると近傍の自然岩礁と同程度の場が創出された場合もある。

一方, 海岸線の多くは機能面などの制約のため直立構造物となっている。したがって, 直立構造物に効果的な環境配慮機能を付加することは, 港湾をはじめ閉鎖性海域の環境の保全・修復を図るうえで, 重要な課題である。

直立構造物への環境配慮技術としては, 海水導水工(例えば, 瀬戸口ら, 2006)や通水型防波堤(例えば, Akakura ら, 2006)など海水交換機能に着目したものが事業化されている。生物生息場としての機能に配慮したものとしては, 横山ら(2003), 田中ら(2004), 中西ら(2006)他の取り組みがあげられるものの, 実証実験や基礎研究段階のものが多く事業化に至った例は未だ少ない。

村上ら(2006)は, 海域特性を考慮して直立構造物に人工浅場を導入する「エコシステム式海域環境保全工法」について, 小規模な実験構造物を用いた仮説-検証-改良の研究開発過程を経た後, 貧酸素化が起こる三島川之江港の防波堤(以下, 本防波堤と言う)で事業化に至った経緯を総括している。

本研究では, 今後の直立構造物を用いた環境配慮技術の開発と事業化に寄与することを目的として, 本防波堤を対象として計画段階で設定された環境配慮機能に関する目標の達成状況について評価を行った。さらに, 構造物を用いた環境配慮技術の開発, 改良に関する順応的管理手法の考え方について示した。

## 2. 調査位置および構造物

調査位置図を図-1, 本防波堤の構造図を図-2にそれぞれ示す。燧灘の奥部に位置する調査海域の三島川之江港は大阪湾奥や広島湾奥と同様に典型的な閉鎖性海域で

1 フェロー 工博 徳島大学環境防災センター 客員教授  
2 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  
3 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 教授  
4 正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 教授  
5 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 所長  
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(生物資源工) (株)エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部長

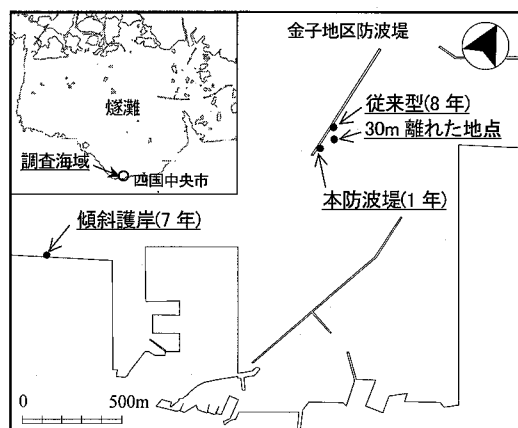


図-1 調査位置図 (愛媛県四国中央市、三島川之江港)

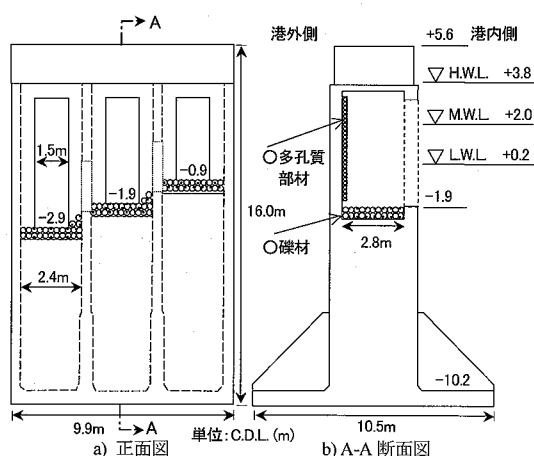


図-2 エコシステム式海域環境保全工法を導入した防波堤

あり、夏季に底層で貧酸素化が生じる。塩分は極表層で 30 psu を下回ることもあるが、年間を通じて表層から底層まで 30 ~ 32 psu 程度である。潮位差は 3.6 m、防波堤の設計波高は  $H_{1/3}=2.9$  m (WNW) である。

調査対象構造物である本防波堤は 2005 年 12 月に設置され、施工後 1 年経過している。他に比較対照として 8 年経過後の従来型直立構造物、比較的豊かな生態系であり、本防波堤における出現生物の目標となる 7 年経過後の傾斜護岸 (1 : 1.5 勾配) でも調査を行った。防波堤 1 函の幅は約 10 m で、C.D.L. -0.9 m, -1.9 m, -2.9 m に幅 2.4 m、奥行き 2.8 m の人工浅場を導入している。人工浅場の壁面には多様な生物生息場となることを期待した空隙率 25 %、厚さ 20 cm の多孔質部材、底面には  $\phi 30$  cm の礫を 2 層敷設している。なお、本防波堤は 10 函設置されており、合計約 200 m<sup>2</sup> の人工浅場が創出されたことになる。

### 3. 評価方法

本防波堤の環境配慮機能として、①適切な生物生息場として機能しているか、②構造物壁面に生息する付着生物由来の海底への有機物負荷が従来型に比べ削減されているかの視点 (村上ら, 2006) で評価を試みた。なお、①においては、水産用水基準 (日本水産資源保護協会, 2000) に示されている「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」に安全性を見込んだ 5 mg/l の値が本防波堤内の底部で満たされていること、本防波堤内に自然加入が期待されたマナマコやメバル、イシガニなどの指標種が確認されることなどを目標としている。

①では、貧酸素化する夏季に本防波堤内の底面において 10 分間隔で DO の連続観測 (アレック電子 (株) 製, Compact-DOW) を行い、多様な生物が生息できる程度の DO が確保されているかどうかを検証した。さらに、潜水目視観察により比較的生物相が豊かな付近の傾斜護岸にみられる大型の底生動物や魚類が本防波堤内に自然加入したかどうかを評価した。また、従来型の直立壁面、傾斜護岸の消波ブロック壁面、本防波堤内の壁面の多孔質部材に生息する付着動物の定量分析を行い、付着動物相の組成と湿重量を比較することで生物相の遷移状況などを把握した。

②では、従来型と本防波堤の港内側の前面 1 m 以内のフーチング上、構造物壁面に生息する生物由来の有機物負荷が直接及ばない港内側に 30 m 離れた地点 (以下、対照区と言う) において、C.D.L. -10 m に負荷される TOC フラックス量 (gC/m<sup>2</sup>/day) をセディメントトラップ (口径  $\phi 83$  mm, 高さ 255 mm) で計測し、地点間で比較評価した。本調査では地点ごとに 3 検体採取し、分析に際してはフジツボ類などの殻成分に由来する TIC を除去するため 1N の塩酸で前処理を行った。

これらの調査は、2006 年 2 月と 7 ~ 8 月、2007 年 2 月に行った。

### 4. 結果および評価

#### (1) 生物生息場としての機能

##### a) DO の検証

図-3 に 2006 年 7 月 26 日 ~ 8 月 25 日までの DO の連続観測結果を示す。図には C.D.L. -0.9 m, -2.9 m の中間的な値であった C.D.L. -1.9 m を省略して示した。

本防波堤内の底面部の水深は、水温躍層の発達水深と DO の鉛直分布に基づいて、5 mg/l の目標が満たされるように配慮して設定している (水谷ら, 2005)。

図-3 より DO は C.D.L. -0.9 m においては常に 5 mg/l を上回っていた。C.D.L. -2.9 m では、8 月 18 日

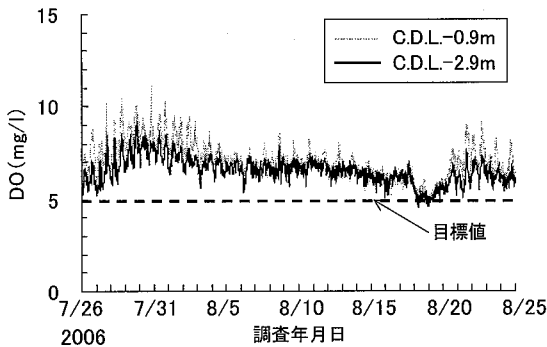


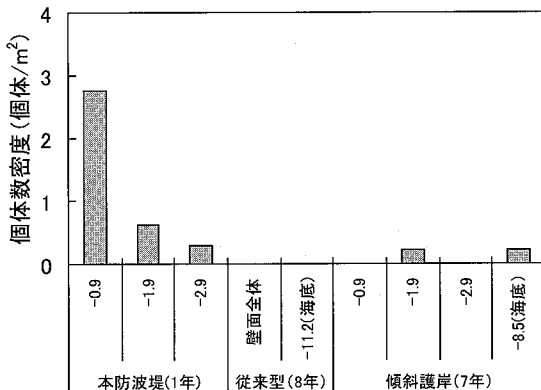
図-3 本防波堤内の底面部における DO の経時変化

に台風 200610 号の影響による日照時間の低下や鉛直混合のため DO が低下して 5 mg/l を若干下回ることがあったものの、4.3 mg/l を下回ることにはなかった。これらのことから、目標は概ね達成されており、DO の観点からは本防波堤内の底面部が多様な生物の生息可能な場として機能する条件を備えていることがわかった。

#### b) 底生動物・魚類の加入状況

図-4 に指標種として掲げていたマナマコの確認個体数を示す。従来型の壁面全体とは、C.D.L.±0 ~ -11.2 m の直立壁面全体のことを示す。

マナマコは富栄養化した海底における代表的な表在性の堆積物食生物であり（北野ら，2003），体色が青色，赤色，黒色の個体がみられる。アオナマコ，クロナマコは内湾性の砂泥質地帯，アカナマコは外洋性の岩礁地帯を主な生息場とするが（崔，1963），それらの遺伝的特性に関する知見は乏しい（北野ら，2003）。指標種として設定した理由は，対象海域に冬季から春季にかけて多く分布し，物質循環の重要な役割を担う生物の一種と考えられたことと，事前調査の結果，従来型の周辺にはほとんど確認されず本防波堤内に加入することが期待され



場所および水深: C.D.L.(m)

図-4 マナマコの確認個体数 (2007 年 2 月)

ためである。さらに、マナマコは移動性に乏しいことから貧酸素化の影響を受けやすく（崔，1963）本防波堤の生物生息場としての評価に適していることと，移動性の高い魚類に比べて定量評価も容易と考えたためである。

マナマコは従来型では確認されず，目標とした傾斜護岸でも最大 0.2 個体 / m<sup>2</sup>であったが，本防波堤内では C.D.L.-0.9 m で 2.8 個体 / m<sup>2</sup>確認された。なお，本防波堤内のマナマコのほとんどは体長 5 cm 未満であった。

崔（1963）によると本調査で確認された「アオナマコ」は 6 月初めに発生し，浮遊幼生期を経て 8 月頃岩礁の石灰藻類などに付着する。さらに，11 月から翌年の 6 月にかけて約 6 cm，9 g にまで成長する。また，マナマコの生息分布を規制する最も重要な要素として，特に水温，塩分，底質の 3 条件と幼生の着底場所の有無をあげている。加えて，DO が高い場所で生息量が多いことなどを指摘している。アオナマコの好適水温範囲の上限値は 17.5 ~ 19.0 °C，塩分の適応下限値は 22.3 psu である。

本防波堤内の底面部では，冬季から春季にかけてアオナマコの好適水温範囲，適応下限塩分を満たしている。また，マナマコの好む礫材（倉田ら，2001）を用いたこと，DO が豊富な平面場が確保されていること，未分解の有機物を多く含んだ付着生物由来の物質が供給されるため餌料環境が充実していることなどから，底面部は他の地点に比べてマナマコの着底，生息に適した場であると評価できる。すなわち，マナマコの生活史を考慮すると，確認された 5 cm 未満の個体は本防波堤の導入後に浮遊幼生が自然加入し成長したものと推察される。

他の指標生物としては，DO 低下の影響を受けやすい節足動物のエビ・カニ類および事前調査において傾斜護岸で多くみられた根付きの魚類を設定している。

表-1 に示すように，分布種の確認を主な目的とした概略的な目視観察結果から，本防波堤内では従来型にはみられないサラサエビやイシガニなどが確認できた。また，それらを捕食するメバル，アイナメなどの根付きの魚類も確認できたことから，目標は達成されつつあると評価できる。

表-1 魚介類の確認状況 (2007 年 2 月，6.5 m<sup>2</sup>当たり)

| 地 点        | 魚 類                               | 大型底生動物                             |
|------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 本防波堤 (1 年) | メバル r, アイナメ rr, スズメダイ rr, ゴンズイ rr | サラサエビ r, アカニシ rr, イシガニ rr, キヒトデ rr |
| 従来型 (8 年)  | メバル r, スズメダイ r, ハオコゼ rr, ゴンズイ rr  | キヒトデ rr, イトマキヒトデ rr                |

注 1: rr は 1 ~ 2 個体・r は 3 ~ 10 個体，注 2: マナマコを除く

#### c) 付着動物相の遷移状況

図-5 に各構造物における付着動物の種構成を示す。

本防波堤内では 2006 年 7 月にムラサキイガイが急増

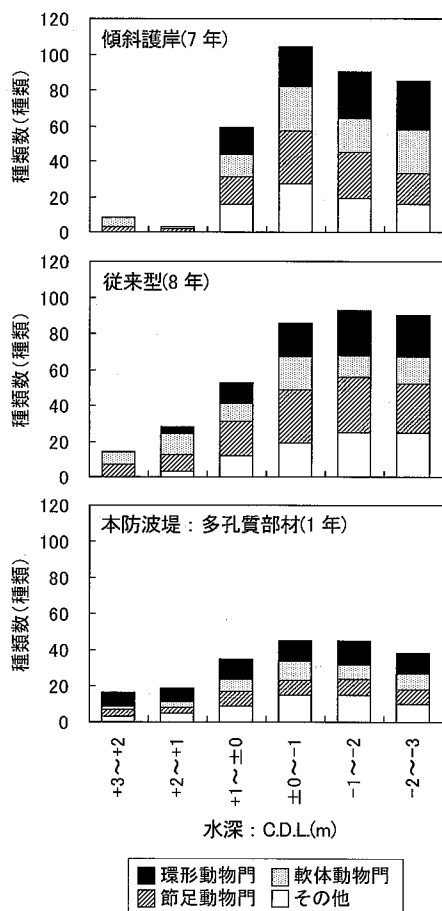


図-5 付着動物の種構成 (2007年2月)

したもの、2007年2月までには脱落し従来型の優占種であるマガキが加入した。湿重量は他の構造物よりも大幅に下回っており、本防波堤内では未だ生物遷移の過程であることが伺われた。

各構造物壁面の付着動物種類数を比較すると、本防波堤では他の1/2～1/3程度であり、生物遷移過程の初期であることが要因と考えられた。なお、本防波堤内には光がほとんど当たらないため海藻類が少なく葉上動物や藻食動物の加入は期待できないものの、多孔質部材を使用したことで、干出するC.D.L.+3～+1mにも埋没性の環形動物などの生息可能な場が創出できたと評価できる。

## (2) TOC フラックスの削減機能

表-2に植物プランクトンや付着動物の活性が高い夏季における海底(C.D.L.-10m)へのTOCフラックスについて、各構造物前面と対照区を比較したものを示す。

TOCフラックスは、直立構造物に生息する付着生物由来の有機物負荷の影響を直接受けない対照区の

表-2 TOC フラックスの比較(2006年7月)

| 地 点       | TOC フラックス (gC/m <sup>2</sup> /day) |      |        |
|-----------|------------------------------------|------|--------|
|           | 平均 (N=3)                           | 標準偏差 | 対照区との比 |
| 従来型 (8年)  | 7.74                               | 2.83 | 18.43  |
| 本防波堤 (1年) | 1.11                               | 0.03 | 2.64   |
| 対照区       | 0.42                               | 0.00 | 1.00   |

0.4±0.0 gC/m<sup>2</sup>/day を1とすると従来型の7.7±2.8 gC/m<sup>2</sup>/dayで18倍、本防波堤の1.1±0.0 gC/m<sup>2</sup>/dayで3倍であった。従来型と比較すると本防波堤では1/6に留まっており、TOCフラックスが約80%削減されていることがわかった。しかしながら、この結果は尼崎港での実証実験結果におけるTOCフラックスの削減率が約60%(三好ら, 2004)であったことと比較すると値が大きい。この理由は、主に本防波堤内における生物相が未だ遷移初期であり、生物量が少なく、負荷も少なかったためと考えられる。

ここで、海底への有機物負荷量が削減されることによる周辺環境への波及効果について考えてみる。付着動物から排出される物質は体内を通過せず擬糞と言われる形で排泄される量が多く、例えばマガキでは摂餌量の60%、ムラサキガイでは50%に及ぶ(栗原, 1998)。擬糞は生物の粘液で固められたものであり、沈降速度が速い。すなわち、付着生物を経由した有機物は未分解のものを多く含むため海底付近での貧酸素化を促し、海域環境を汚濁させるように作用している(三好ら, 2006)。したがって、付着生物由来の有機物負荷をDOの豊富な本防波堤内の底面底部で受け止めて、生物を介した好気的分解を作用させることは、海域環境の修復に寄与すると言える。

## 5. 本事業における順応的管理手法の考え方

調査結果から、本防波堤では計画段階で設定した目標は達成されつつあることが確認できたが、生物相や構造物前面への有機物負荷量の最終的な評価については、生物相が安定する時期まで行う必要がある。また、夏季における人工浅場の底面底部のDOはこれまでのところ概ね目標値の5mg/lを満たしていたが、付着生物量の増加に伴い底面底部への有機物負荷量が増加するようになると、特に水深の深いC.D.L.-2.9mでは目標が達成されない恐れもある。

環境配慮施設の造成に際しては抽出された課題について順応的に対応することが提唱されており、干潟造成などをはじめ、今後必要不可欠な手法になると考えられる。

ここで、生物生息場としての物理的、生物的安全性の観点から考えると、石材やコンクリート製の構造物を利用した環境配慮施設は岩礁性の生態系を造成するものであり、構造物の据付後は、生物生息基盤が安定してい

るために有機物、無機物の介入に伴って比較的速やかに対象海域に応じた生態系が成立すると期待される。その反面、構造物の供用後に基本的な構造を順応的に改変することは難しいため、順応的管理の考え方を整理しておく必要がある。

この点については、①生物生息場としての安全性を十分に考慮して設計すること、②モニタリング結果を踏まえて設計を見直すとともに段階的に行うこと、③得られた知見を事業者が有効活用できる仕組みを構築、運用することが現実的な手法と考えられる。

①については、生物生息場の設計を行う際、科学的根拠に基づいて可能な限り多様な形状にするなど柔軟な対応を図ることが肝要である。例えば水谷ら(2005)は、本防波堤の浅場を設計するにあたって、水温躍層の発達水深がC.D.L.-4m付近であったことを考慮し、貧酸素水塊が及ばないよう安全性を考慮してC.D.L.-0.9m, -1.9m, -2.9mの3水深に浅場を設定している。

②、③についてはモニタリングで蓄積された知見を有効活用するために、計画段階から段階的に行う考え方を取り込んで実施することが望ましい。なお、本防波堤の設置にあたってはこれらのことに配慮して適宜更新可能な技術手引書を作成しており、このような取り組みも本事業の特徴と言える。

## 6. 結 論

直立構造物にエコシステム式海域環境保全工法を導入することで、付着動物の糞や死骸を摂餌する堆積物食動物や肉食動物が自然加入し、結果として生物を介した物質循環の促進によって汚濁負荷の軽減に寄与するといった環境配慮機能を事業化段階で示すことができた。今後は生物相が安定するまでモニタリングを継続し、生物相の遷移状況や年変動を考慮して評価を行う。その際、必要に応じてモニタリング調査内容を見直していく。また、モニタリングを通じて集積された知見については、将来計画に活かしていくことが重要と考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、島根大学汽水域研究センターの倉田健悟准教授、(独法)産業技術総合研究所の三好順也氏、国土交通省四国地方整備局 松山港湾・空港整備事務所ならびに三島川之江港事務所の皆様からは多大なご協力を頂いた。ここに記して、関係者各位に深く感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

北野倫生・上月康則・倉田健悟・村上仁士・山崎隆之・芳田英郎・水谷雅裕(2003): 夏季における堆積物食動物マナマ

- コ (*Stichopus japonicus*) の生物攪拌, 土木学会論文集, No. 741, VII-28, pp. 49-56.
- 倉田健悟・上月康則・村上仁士・芳田英郎(2001): マナマコ (*Stichopus japonicus*) の生息場所選定に関する実験的検討, 土木学会四国支部 第7回技術研究発表会 講演要旨集, pp. 528-529.
- 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.
- 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ビオトープづくり—, 水, Vol. 44, No. 9, pp. 65-72.
- 国土交通省港湾局(2005): 港湾行政のグリーン化, (独)国立印刷局, 125p.
- 崔相(1963): なまここの研究—まなまこの形態・生態・養殖—, 海文堂, 226p.
- 阪上雄康・浅山英章・北澤壯介(2003): 関西国際空港2期空港島における藻場造成について, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 13-18.
- 瀬戸口喜祥・吉村直孝・佐藤昭人・阿部龍介・藤井 浩・村上芳喜(2006): 日本海における波浪を利用した海水導水工ケーソンの現地評価, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 876-880.
- 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.
- 中泉昌光・川合信也・吉村直孝・長野 章・渡部弘之・安田淳(2004): 港堤付防波堤の構造特性と生物生育環境創出効果について, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1106-1110.
- 中西 敬・中村由行・川井浩史・勝海 務・齊藤安立・山田桂介(2006): 「ロープ式藻場」による垂直構造物への環境機能付加手法に関する基礎的実験及び考察, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1201-1205.
- 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海岸構造物によるムラサキイ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.
- 三好順也・上月康則・倉田健悟・村上仁士・野田 厳・岩村俊平(2006): 港湾環境に及ぼす直立壁面の付着性二枚貝の影響に関する考察, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1116-1120.
- 村上仁士・上月康則・三好順也・野田 厳・久本忠則・伊藤春樹・岩村俊平・北野倫生・山本秀一(2006): 直立型海岸構造物を利用した浅場創出事業, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1221-1225.
- 山内 浩・横田 弘・加藤絵万・岩波光保(2006): 経年劣化した棧橋の耐荷性を考慮したライフサイクルシナリオに関する検討, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 199-204.
- 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.
- Akakura, Y., S. Hanashiro, S. Urabe, H. Maehara, M. Ono, T. Mizoguchi, H. Yamamoto(2006): Various contrivances for restoration of coral assemblages in harbor development projects: A report. Proc. 10th Int. Coral Reef Symp, pp. 1651-1656.