

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

THE ECOSYSTEMATIC DESIGN FOR CREATING ARTIFICIAL SHOAL AREA INSIDE OF CAISSON WAVE CHAMBERS

水谷雅裕¹・上月康則²・三好順也³・村上仁士⁴・石本健治⁵・岩村俊平⁶

Masahiro MIZUTANI, Yasunori KOZUKI, Junya MIYOSHI, Hitoshi MURAKAMI,
Kenji ISHIMOTO and Shunpei IWAMURA

¹正会員 工修 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
(〒760-0017 香川県高松市番町1-6-1)

²正会員 博(工) 徳島大学大学院 工学研究科エコシステム工学専攻
(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2-1)

³正会員 修(工) 徳島大学大学院 工学研究科エコシステム工学専攻

⁴フェロー 工博 徳島大学大学院 工学研究科エコシステム工学専攻

⁵正会員 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 設計部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

⁶正会員 修(工) 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部

Upright type port and harbor structures have been adopted to quay walls, breakwaters and other maritime structures. The organic matters of faeces and pseudofaeces loaded by suspended feeder inhabiting on the wall would fall onto seabed of adjacent area, resulting in consuming dissolved oxygen. Eutrophic inner bays usually experience a thermocline during summer season. Therefore, depositions of organic matters derived from attached animals would promote hypoxia in the hypolimnion. The design technique has been developed as one solution of this problem, which is based on the ecosystem engineering for creating the artificial shoal area inside of vertical structures. The objective of the technique is to activate material cycle by installation of artificial shoal through the food web from attached animals to benthic animals feeding organic matter excreted by attached animals.

In the discussion, we proposed the idea for creating the artificial shoal space inside a caisson type upright breakwater developed for the Mishimakawanoe port in Ehime prefecture, located western part of Japan.

Key Words : *Artificial shoal, thermocline, dissolved oxygen, caisson wave chambers, benthic animals, ecosystematic design*

1. はじめに

近年では、浅場の重要性に鑑み、失われた干潟や藻場などを積極的に創造しようとする実験的な検討が試みられるようになってきている。しかしながら、これらは一般に、港湾の中でもごく限られた場所では適用できない。ここで、港湾構造物の多くに直立型構造物が採用されていることを考えると、それらに求められる基本的機能を確保し、生物の生息場としての機能に配慮することも海域環境を修復するための一つの手がかりとなる¹⁾。

護岸、岸壁、防波堤の港内側などに使用される直立型構造物の壁面には、一般に付着力の強い懸濁物食動物が多く生息している。これらは、水中から多量の懸濁態有機物を摂取することから水質浄化作用

の高い生物として紹介されることが多い。しかしながら、ムラサキイガイなどは生物活性の高い夏季から秋季にかけて、糞や偽糞あるいは死亡個体として構造物近傍の水質や底質に過剰な有機物負荷を与えている。その結果、物質循環が滞り海底付近の貧酸素化が進行することが指摘されている²⁾。これらのことから、生態系からみた直立型構造物の課題について整理すると、多様な生物の生息場となる潮間帯部分の基質が単調であること³⁾、潮間帯生物由来の有機物を摂食する堆積物食動物、肉・腐肉食動物の生息場となる浅場を持たないことなどがあげられる。

著者らは、生態工学の観点から直立壁面に生息する生物が排出する海底への有機物負荷を低減させるため、直立型構造物の遊水室に底生動物が生息可能

な人工浅場を創出する技術の開発を行ってきた^{3), 4), 5)}。しかしながら、遊水室の底面付近が貧酸素化するとその機能が損なわれるため、実用化に際しては底面水深の設定方法が課題であった^{1), 6)}。

本論文では、愛媛県三島川之江港の金子地区に設置される予定のケーソン式直立堤の遊水室に人工浅場を創出することを想定し、導入水深を設定する際の生物的設計条件を検討した結果について報告する。

2. 調査海域

調査海域の三島川之江港は、瀬戸内海の中でも比較的閉鎖性の強い海域であり、夏季には大阪湾や広島湾と並んで静穏かつ成層化しやすい⁷⁾環境である。日中には植物プランクトンの増殖などの影響で懸濁物が多くなり、透明度が2m前後に低下する。潮位差は約3.5m、調査対象である金子地区防波堤の設計波高は $H_{1/3}=2.9\text{m}$ (WNW)、フーチングおよびマウンドの天端水深は平均潮位時に約13mとなる。

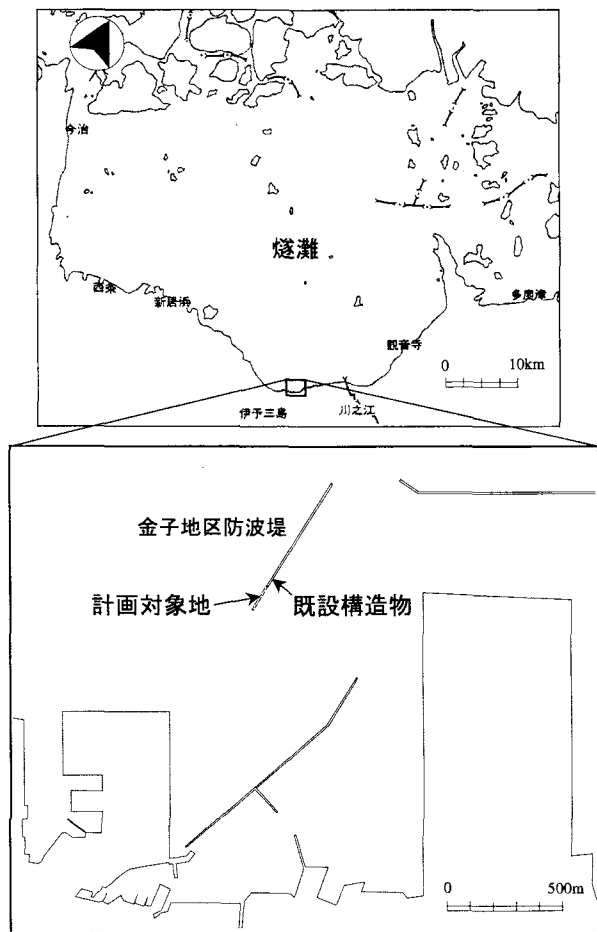


図-1 調査海域 (三島川之江港 金子地区)

3. 水塊構造の検討

(1) 水温・塩分とD0の関係

貧酸素水塊の分布状況は気象、海象条件の影響で鉛直方向に幅を持った挙動を示すものであるため、

限られたデータのみで浅場の底面水深を決定づけることは困難である。人工浅場を多様な生物の生息に適した水深帯に配置するためには、貧酸素化が進行する夏季に多層で長期間にわたるD0のデータを取得し、解析・検討することが望ましい。しかし、自動記録式のD0計は定期的なメンテナンスが必要なうえ高価なため、多数設置することは現実的ではない。

そこで本検討では、D0の鉛直分布が水温または塩分の鉛直分布に関係があることに着目した。つまり、D0が急激に変化する水深帯は、水温あるいは塩分の躍層部分に良く一致しており、躍層の出現水深を統計的に検討することで、貧酸素水塊の発達する水深帯を概略的に把握できると考えた。

(2) D0に対する水塊構造の影響の検討

中村ら⁸⁾は、大阪湾湾奥部の13地点を対象に、8月の底層D0 (%)と表底層の水温差および塩分差の相関を求めている。その結果、塩分差に比べ水温差と底層D0の相関が高かったことから、貧酸素水塊の発達には、水温躍層の存在が寄与していると報告している。本検討では、1982年～2003年の瀬戸内海総合水質調査結果⁹⁾から対象海域近傍の3地点のデータを抽出し同様の検討を行ったところ、塩分躍層よりも水温躍層の存在が貧酸素水塊の発達に寄与していると考えられた。したがって、水温躍層の発達水深が底面水深の目安を決める際の参考になると判断した。

4. 調査方法

図-2に調査対象とした既設構造物の断面図を示す。以下、水深は対象港湾の工事用基準面D.L. (Datum Level) を基準に示す。D.L. $\pm 0.0\text{m}$ はL.W.L. より約0.2m深い水深に相当する。

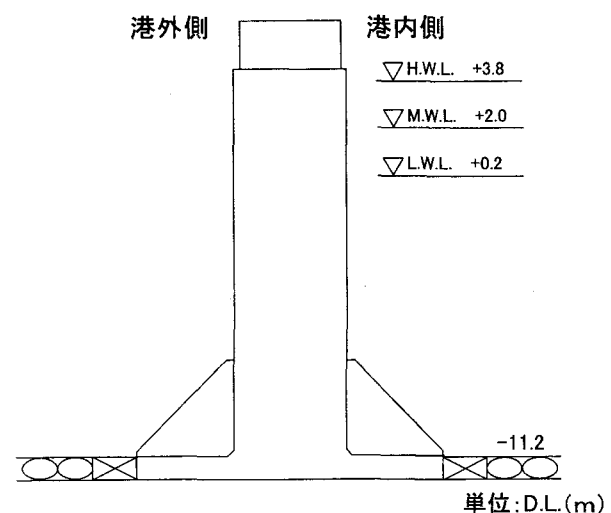


図-2 既設構造物 (断面図)

(1) 水温の連続観測

水温の連続観測では、人工浅場の底面水深の目安となる水温躍層の発達水深を検討するため、長期間

にわたる水温の鉛直分布データの取得を目的とした。図-2に示す防波堤港内側の直立壁面に、水中ボンドで自動記録式水温計（Onset Computer社、Tidbit TBI32-05+37型）を設置した。設置水深は、D.L. ±0～-11mの0.5m間隔、設置期間は2003年7月14日～8月25日の43日間、測定間隔は0.5時間に1回とした。

(2) D0、水温・塩分調査

水温躍層の発達水深を解析し、後述するD0の目安の値を満足しているかどうかを判断するため、既設構造物前面でD0の鉛直分布を観測した。観測には、現場観測用のD0計（メリディアンインスツルメンツファーマーイースト社 YSI-59型）を用いた。水温・塩分についてはSTD計（アレック電子、AST-500型）を用いて観測した。それぞれ、D.L.基準に換算できるよう観測水深に配慮して表層から底層まで0.5m間隔で観測した。観測時期は、水温計の設置、回収日の概ね満潮時および干潮時とした。

(3) 堆積物調査

既設構造物前面と計画対象地の海底面における堆積物の性状を把握するため堆積物調査を行った。現場で泥色、外観、臭気を記録し、別途採取した試料についてTOC、T-Sを分析した。

(4) 沈降物調査

既設構造物に生息する生物由来の有機物負荷量を把握するため、沈降物調査を行った。既設構造物のフーチング上および対照区として防波堤の計画対象地の海底（D.L. -15m）に、φ8.3cm、高さ50cmのセディメントトラップを24時間設置した。捕集した沈降物の全量を求め、さらに1Nの塩酸で前処理した試料についてCNコードを用いTOC濃度を分析した。

(5) 生物調査

a) 付着動物

人工浅場の底面水深を決める目安としての知見を得るため、既設構造物の直立壁面で付着動物調査を行った。調査には幅30cm×高さ100cmの方形枠を用い、既設構造物のD.L. +4～-11mにかけて1m間隔で坪刈りした。得られた試料を1mmのふるいで分類し、種類数、種類別個体数、種類別湿重量を求めた。

b) 底生動物

既設構造物のフーチング上の底生動物相を把握するため、底生動物調査を行った。調査には30cm×30cmの方形枠を用いて堆積物を採取し、1mmのふるいで分類し、マクロベントスの種類数、種類別個体数、種類別湿重量を求めた。

5. 結果および考察

(1) 水温躍層の形成水深の解析

a) 水温差の計算

図-3に調査海域でみられる典型的な水温の鉛直分布の模式図を示す。

調査海域では、太陽光の影響を直接受けて水温が上昇する表層部（躍層①）と、概ね1/2水深よりも浅い水深帯（躍層②）に水温が大きく変化する水深

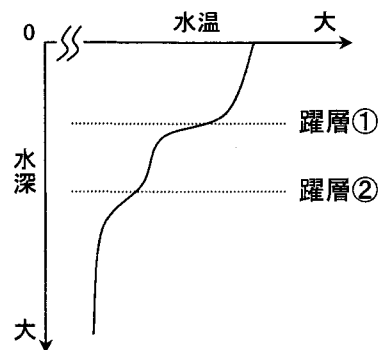


図-3 水温の鉛直分布（模式図）

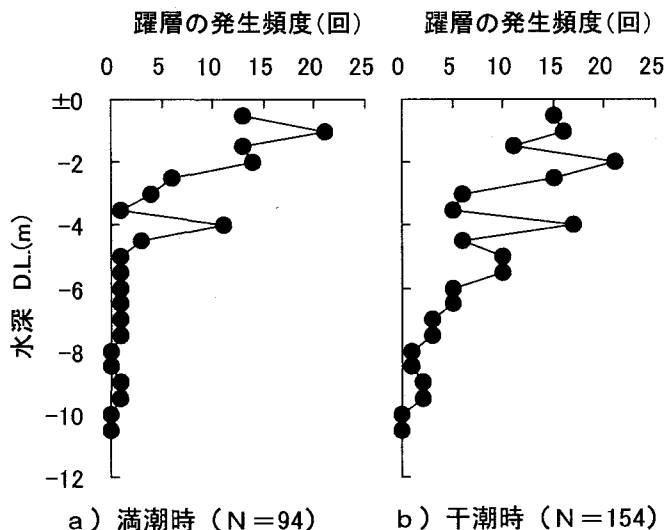
帯がある。このうち前者では日中D0がむしろ過飽和である場合が多いことから、貧酸素水塊の形成に寄与しているのは後者であると推測された。

ここでは水温躍層を呈する水深帯とその直下の水深で水温差が大きいことに着目し、まず観測水深間（0.5m）の水温差を求めた。水温差の計算を行うにあたっては、概ね満潮時および干潮時に相当する時刻のデータを抽出した。台風時あるいはその影響がみられるデータについては計算の対象外とした。

b) 水温躍層の定義と躍層の頻度

水温差が何℃あれば水温躍層を呈しているかという定義は無い。ここでは、水温躍層が発達した時の鉛直分布の傾向を考慮し、観測水深間の水温差について0.1℃間隔で0.1℃以上～0.5℃以上まで順次検討した。その結果、水温差を0.4℃以上とした場合に図-3を基に推測した仮説が良く表現されたことから、水温差が0.4℃以上の水深を躍層と定義した。

図-4に水深別の躍層の発生頻度を示す。



a) 満潮時 (N=94)

b) 干潮時 (N=154)

※N：水温差が0.4℃以上となった総数を示す。

図-4 躍層の発生頻度

D.L. -0.5～-3.5mでは、日照の影響によるものと考えられる躍層の頻度が高い。D.L. -3.5～-4.0m（満潮時）、D.L. -3.5～-5.5m（干潮時）では、直接的な日照の影響とは異なると考えられる躍層がみられ、頻度が高い。D.L. -4.0m以深（満潮時）、

D.L. -5.5m以深（干潮時）では躍層の発生頻度が低く、比較的水塊が安定していると考えられる。つまり、D.L. -4m程度を境界に水塊が二分する傾向にあると考えられた。

(2) 水温・塩分、D0の鉛直分布

調査日の天候は晴天であり、また一週間程度前から降水は無く日照時間も長い日が続いていた。図-5に水温計回収時の水温・塩分、D0の鉛直分布を示す。

満潮時（9:00頃）には、水温はD.L. +3~-2mにかけて漸減し、D.L. -4m付近に躍層がみられる。塩分は、D.L. -4mまで漸増し、それ以深では同程度の値となっている。D0は±0mまでは過飽和であり、D.L. ±0~-7mまで漸減し3mg/lを下回っている。

干潮時（15:00頃）には、日照の影響で満潮時に比べD.L. ±0~-6mまでの水深で水温が上昇している。塩分はD.L. -2m以浅で低下している。D.L. -6m以深では水温、塩分とも満潮時と干潮時で概ね同程度の値となっていることから、水塊が安定していると考えられる。D0は全体的に増加しているものの、底面付近では低い。表層部では過飽和で8mg/lと高く植物プランクトンの活性が高いと考えられる。

(3) 堆積物の性状

既設構造物（以下、既設という）のフーチング上には、構造物が設置された1999年以後に蓄積された20~30cm程度の堆積物があり、内部は黒色でかつ強

い硫化水素臭が確認された。また、堆積物中にはフジツボ類を主体とする石灰質の殻が多く混在していた。計画対象地（以下、計画という）の海底には1999年に地盤改良用の砂が敷設されており、臭気は認められなかった。TOCは既設：61.5mg/g、計画：1.4mg/gであり、既設で計画の約45倍であった。T-Sは既設：0.57mg/g、計画：0.01mg/gであり、既設では水産用水基準の0.20mg/gを大幅に上回っていた。これらのことは、構造物の直立壁面に生息する生物の死骸や糞などの有機物が、底質の性状に与える影響の大きさを示唆している。

(4) 沈降物量および性状

沈降物量は、既設： $132.5 \pm 12.9 \text{ g/m}^2/\text{day}$ （ $N=3$ ，以下同様），計画： $78.2 \pm 3.7 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，TOC濃度は、既設： $76.6 \pm 2.5 \text{ mg/g}$ ，計画： $34.5 \pm 2.6 \text{ mg/g}$ であった。また、沈降物量とTOC濃度の積で算出されるTOC負荷量は、既設： $10.1 \pm 0.8 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，計画： $2.7 \pm 0.1 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であり、直立型構造物の存在により構造物が無い場合の3.8倍大きいことがわかった。堆積物の性状と併せて考えると、直立壁面に生息する生物由来の有機物が構造物前面の底質環境を悪化させているといえる。

(5) 生物の分布状況

a) 附着動物

図-6に種類数、図-7に湿重量の鉛直分布を示す。

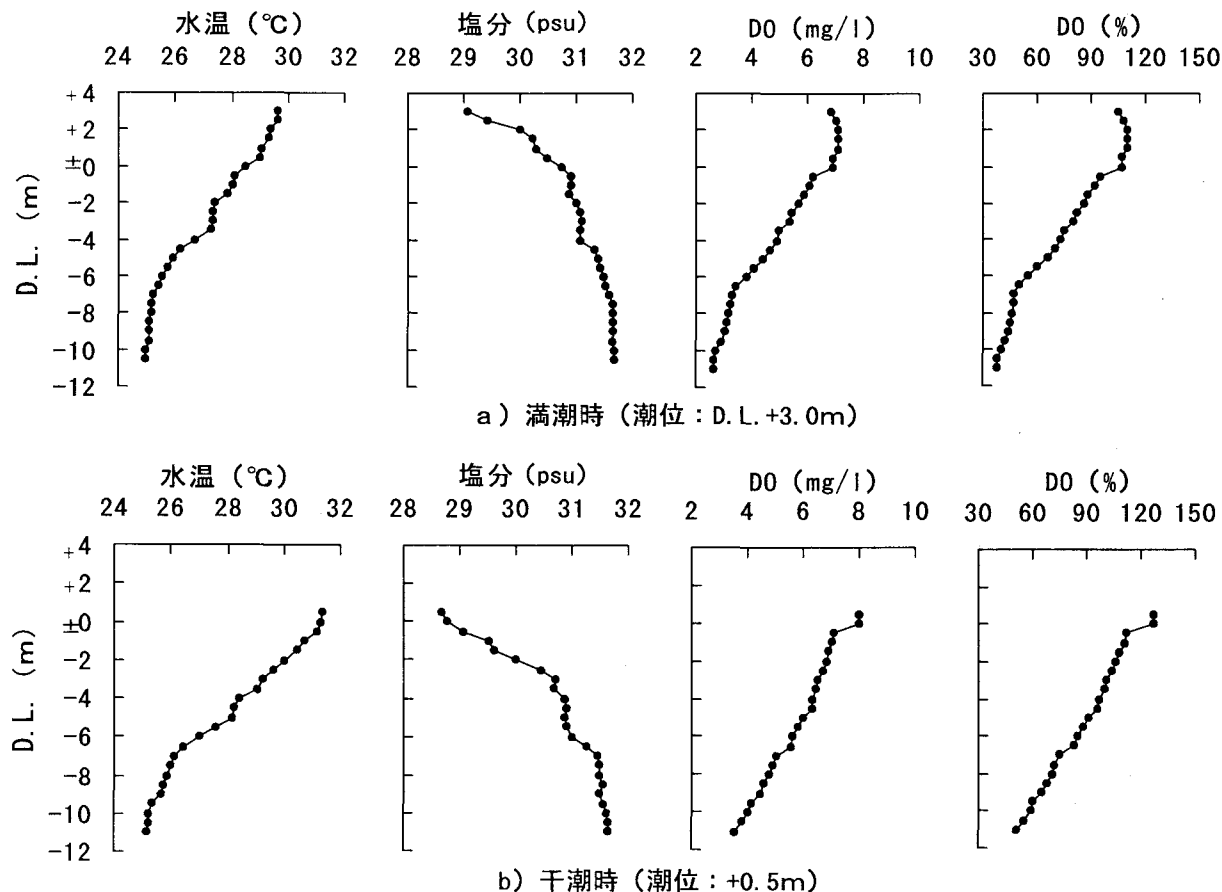


図-5 水温・塩分、D0の鉛直分布（2003. 8. 25）

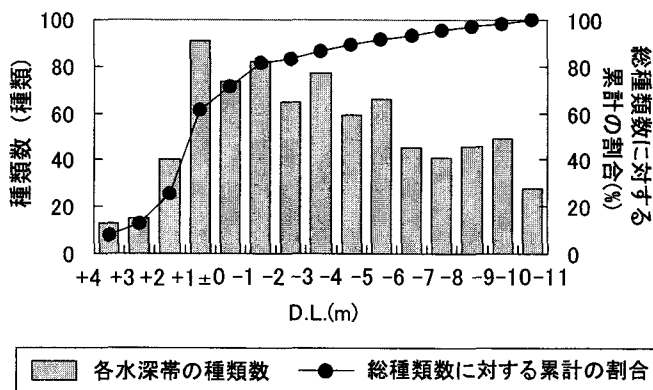


図-6 付着動物種類数の鉛直分布 (2003. 8)

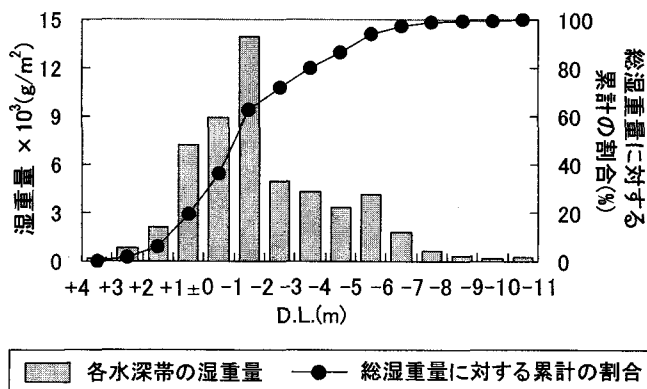


図-7 付着動物湿重量の鉛直分布 (2003. 8)

種類数は、D.L. +1～-6mで多く、D.L. +1～±0mで91種類と最も多かった。D.L. +4～+1mおよびD.L. -6m以深では40種類前後と少ない。総種類数は167種類であった。種類数の割合をみると、D.L. -2mまでで全体の約80%の種類が出現し、それ以深では漸増している。湿重量は、D.L. +1～-6mで多く、D.L. -6mまでで全体の約95%を占めていた。構造物1m当たりの総湿重量は $5.3 \times 10^4 \text{g}/15\text{m}^2$ であり、おもな優占種はイワフジツボ科のイワフジツボ、フジツボ科のアカフジツボ、イタボガキ科のコケゴロモガキであった。既設構造物では数種の懸濁食物動物に偏った生物相となっているといえる。

b) 底生動物

既設構造物前面底部の底生動物相は、種類数：35種類、個体数：280個体/m²、湿重量：3.3g/m²であった。ホンヤドカリ科などの肉食あるいは腐肉食動物が確認されているものの、付着生物の現存量と比較すると個体数、湿重量とも明らかに少なかった。

6. 生物的設計条件の検討

(1) 人工浅場に期待するD0の目安

人工浅場を介して懸濁物を起点とする物質循環が円滑に機能するためには、人工浅場に負荷された付着動物由来の有機物を摂食する底生動物が健全に生息できる程度のD0が確保されていなければならない。本検討では、水産用水基準にある底生生物の生息状況に変化を引き起こす臨界濃度：4.3mg/l¹⁰⁾を参考

にした。加えて、人工浅場に生物が生息するようになると、遊水室内部の溶存酸素が消費されることにも留意する必要があるため、人工浅場に期待するD0の目安として5mg/lを採用することとした。

(2) 人工浅場の設置水深

a) 下限設置水深の目安

図-4より、水温躍層の発達水深は満潮時、干潮時ともD.L. -3.5～4.0mで頻度が高い。また、限られたデータではあるものの、図-5より海象条件が安定していた日のD0は満潮時、干潮時ともD.L. -4m以浅で5mg/l以上であった。これらのことより、浅場の下限設置水深の目安をD.L. -4mと判断した。適応生物種の少ない潮間帯上部を除くと、D.L. -4m以浅であれば多様な底生動物が生息できる可能性が高い。

b) 上限設置水深の目安

本技術のねらいは、付着動物の死骸や糞などを可能な限り多く人工浅場で受け止め、人工浅場に生息する底生動物がそれらを利用することで物質循環が円滑化することにある。つまり、D.L. -4mよりも浅い水深であっても、浅すぎる場合は必ずしもねらいが達せられるとは限らない。したがって、おもに海底に負荷を与える懸濁食物動物の現存量を考慮して、浅場の上限設置水深を決める必要があると考えた。図-7より、既設構造物における付着動物の湿重量はD.L. -2mまでで構造物全体の約60%、D.L. -4mで約80%、D.L. -8mでほぼ100%が分布している。また、種類数は図-6よりD.L. -2mまでで全体の約80%の種類が出現しており、それよりも深い水深では漸増する程度である。これらのことより、下限設置水深の目安のD.L. -4mを考慮すると、上限設置水深の目安はD.L. -2mが適当であると考えられた。なお、この目安は構造物前面海底への有機物負荷量に配慮するうえでの判断材料の一つと考えている。

(3) 生物の生息に配慮した人工浅場の設置方法

緩傾斜堤は沖方向に連続的で緩やかな傾斜を持つことから、直立型構造物に比べ生物生息場として優れていることはよく知られている。本検討では、上限、下限設置水深の目安を参考に、浅場の設置水深を3つの遊水室間で変化させ、多様な生物の生息場となるよう配慮した。なお、水深に多様性を持たせることで、貧酸素水塊を回避する浅場の機能を柔軟に発現させることも期待した。具体的には設置した構造物の若干の沈下量とD0の変動分を考慮して、人工浅場の底面水深をD.L. -1.5、-2.5、-3.5mとした。

また、既設構造物周辺ではメバル、クロダイをはじめとする根付きの魚類が数種類確認されている。このことから、遊水室に移入した魚類や大型底生動物が遊水室間を移動できるように、各部屋の隔壁に縦2m×横1mの開口部を設けることにした。

図-8に本検討で得られた知見に基づいて提案したケーソン直立防波堤への人工浅場の適用イメージを示す。直立部には多毛類など埋在性の生物の生息を

促す¹¹⁾ため、空隙率25%、厚さ20cmのポーラスコンクリートを用い、底面部には大型底生動物や底生魚類の生息を促す¹²⁾ため、φ30cm程度の礫材を厚さ60cmで敷き詰めることにした。

7. おわりに

技術に期待する生態系の自己設計能力¹³⁾を望ましい方向に誘導するには、環境の変動に応じた生物生息場としての機能を把握し、知見を積み重ねていく必要がある。著者らの研究では過去8年間にわたる基礎研究と実証実験を経て、人工浅場としての機能が発現されるような設計条件を検討してきた^{5), 6)}。

本検討ではこれらの検討結果を踏まえ、おもに水温躍層の発達水深と付着動物の分布状況からケーソンの遊水室に導入する人工浅場の底面水深について具体的な設計条件を提案した。技術の導入後は、人工浅場でD0の目安が満たされているかどうか、構造物前面への有機物負荷量の削減効果などについて検証し、技術の評価と改良に関する知見を得るためのモニタリングを行っていく予定である。

参考文献

- 1) 岩村俊平・山本秀一：生物多様性の向上と物質循環の活性化をめざした港湾構造物の開発ーエコシステム式海域環境保全工法ー，土木施工，第44巻7号，pp.44-49，2003。
- 2) 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：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イガイの成長と脱落，海の研究，4，pp.9-18，1995。
- 3) 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：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，Vol.33，pp.367-375，2001。

4) Iwamura S., Kurata K., Kozuki Y., Yamamoto H., Nishimura T., Murakami H., Mizuguchi H., Sasayama H.: Succession Process in the Structure for the Environmental Restoration Applied to Enclosed Sea Areas, EMECS2001, p.242, 2001.

5) 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：岸壁付帯式テラス型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.1061-1066，2004。

6) 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：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/Ⅱ-30，pp.95-104，2004。

7) 柳哲雄：潮目の科学，恒星社厚生閣，pp.25-28，1990。

8) 中村由行・西村肇：沿岸域における貧酸素水塊の形成機構，海岸工学講演会論文集，No.35，pp.29-38，1988。

9) 国土交通省中国地方整備局：瀬戸内海総合水質調査，<http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/gicyo/>

10) 日本水産資源保護協会：水産用水基準（2000年版），p.21，2000。

11) 上月康則・村上仁士・岩村俊平・豊田裕作：堆積物捕食生物ゴカイの個体数維持に有効な多孔質担体の特性，土木学会四国支部 第5回技術研究発表会講演要旨集，pp.404-405，1999。

12) 倉田健悟・上月康則・村上仁士・芳田英朗：マナモコ（*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.528-529，2001。

13) 栗原康：共生の生態学，岩波書店，235p，1998。

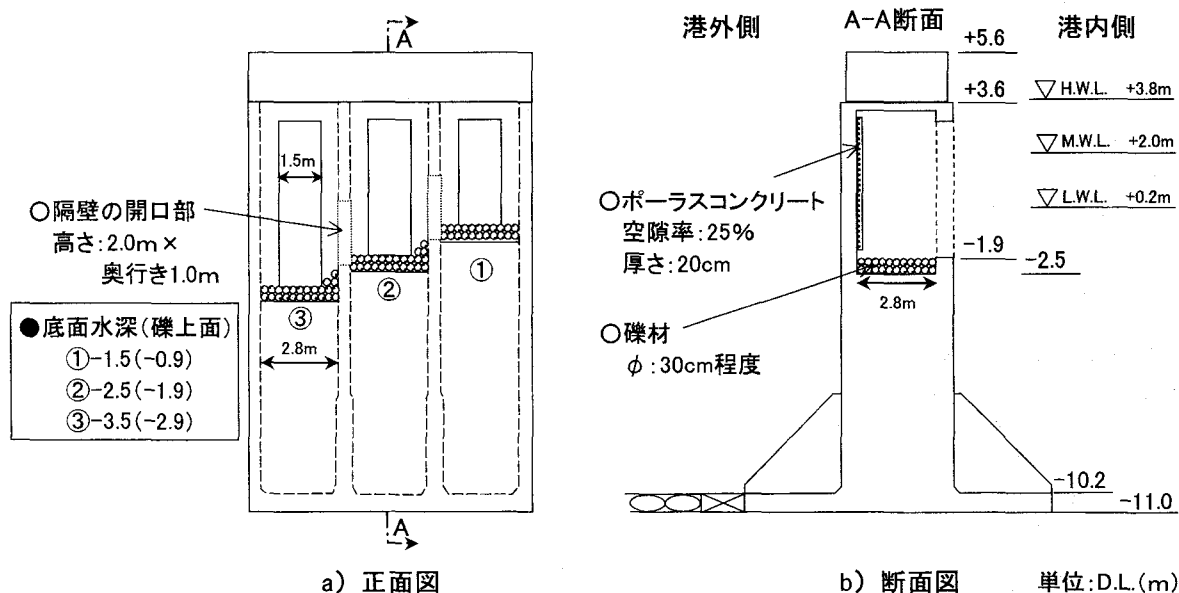


図-8 人工浅場の適用イメージ