

# 流動制御機能を有する人工魚礁の開発と環境改善機能

香川大学工学部安全システム建設工学科 教授 末永 慶寛

## 1. はじめに

我が国の沿岸海域は、暖流や寒流の影響を受けて多種多様な藻場が分布しており、世界的に見ても恵まれた環境となっているが、近年、全国的に藻場面積が減少しつつある。環境省の調査によると、昭和53年以降、日本全国で約5,000haの藻場が減少しており、本論の対象海域である備讃瀬戸においても、昭和53年以降、325haの藻場が減少している<sup>1),2)</sup>。藻場は干潟とともに、海域における生物生産力向上や環境負荷の低減に多くの役割を担っている<sup>3),4)</sup>。

藻場が持つ第一の機能は、海洋生物の幼稚子を育む「海のゆりかご」としての機能である。藻場は産卵場であるとともに、外敵生物に捕食され難い空間を提供する、餌料生物となる葉上葉間生物が豊富に生息する等、稚仔魚の着生場、生息場、隠れ場、餌場といった様々な機能を持つ。

第二の機能は、藻場を形成する海藻群落を持つ二酸化炭素の吸収固定機能である。森林が二酸化炭素の吸収固定能力を有しているのと同様に、「海の森」と呼ばれる藻場にも同様の能力があることから、藻場の造成と拡大は地球温暖化防止に少なからず寄与していると考えられる。

第三の機能は、藻場を形成する海藻群落が持つ栄養塩類の吸収固定機能である。海藻は窒素、リン、カリウム等の栄養塩類を吸収し、光合成を行い生長する。海水中の窒素やリンが高濃度な状態、富栄養化状態が続くと、植物プランクトンの異常増殖、赤潮が発生し易くなる。そこで、海藻群落が海水中の栄養塩類を吸収して、その濃度を低く保てば、植物プランクトンの増殖が抑制され、透明度が高くなり水質環境が良好に保たれることになる。

第四の機能は、第三の機能に関連して、藻場を形成する海藻が流れ藻になり、栄養塩類を域外に移出する機能

である。栄養塩類を吸収固定した藻体は流れ藻となって域外に流出し、バクテリアや細菌等による生物化学作用を受けて徐々に無機態に変化する。そのため、海域の環境負荷を低減する観点からは、域内で再度無機化されるのではなく、漁業活動（水産生物の場合は漁獲、海藻の場合は採草）を通じて、栄養塩類を吸収固定した漁獲物（あるいは藻体）として域外、特に陸域に移出されることが重要となる。

備讃瀬戸海域は、大小様々な島々から成る複雑な地形と“潮”の流れに加えて、水産生物を育む浅場、藻場が点在することから、多種多様な魚介類が漁獲されてきた。また、入江が多く波浪が穏やかなことから、タイ類、ブリ、海苔、牡蠣等の養殖が盛んに行なわれてきたが、近年、沿岸域の都市化に伴う環境悪化、魚介類の乱獲等様々な要因により、漁獲量はピーク時の1/3程度まで減少している。備讃瀬戸の藻場は漁獲量の減少に併行するように、昭和53年（1978年）から平成元年（1989年）にかけて、埋め立てや海砂採取により80ha、原因不明により245haが消滅している。これまで、全国各地で水産資源生産力増強を目的とした漁場造成、藻場造成事業が実施されてきた。しかし、従来の漁場造成計画では、事業内で設置される人工魚礁に代表される構造物は、生物生息環境を好適にするための海藻孢子や小型餌料生物等の滞留を促進するための流動制御機能に極めて乏しく、海底に設置された構造物が有する影響範囲は、いわば点の効果でしかなく、投資金額に対して経済的とは言い難いのが現状である。特に、浅海域に設置する場合は潮流に代表される流動環境の影響が強いことから、事業対象となる有用魚類の保護・育成を図るためには、人工魚礁が有する既存の餌料培養機能の他に流動制御機能についても定量的な評価が必要となっている。

筆者らは、前述の問題を解決するために産学官の共同

研究 G を結成し、現地観測によって求めた流速や海底地形等のデータを基に、先ず人工魚礁模型を用いた水理実験を行い、これまで不明な点の多かった構造物が有する流動制御機能の影響範囲を構造物周辺および内部に渡って定量的に評価し、漁場造成計画に反映させることに着目した。

次に、同一構造物内にコンクリート、鋼材、石材等からなる複数の基質を装着させ、多方向からの流れに対して流動環境制御が可能で、餌料環境形成のための小型餌料生物着生を促進する増殖機能を有する水産資源増殖構造物を開発し、実海域への設置および構造物周辺および内部に渡る生物増集効果も調査した。

以上の手法や結果を基に、既存の魚礁構造物では実現が困難であった、異なる海域環境に応じた造成適地選定や配置計画に適応可能な構造物として、今後の漁場造成および水産資源生産力増強に関する有効性の検証例を紹介する。

## 2. 自然エネルギー（潮流）を制御する人工魚礁

今回紹介する人工魚礁の形状は、図 1 に示すような 8 角形を基本としている。長さ、幅は 5.6m、高さは、水深に応じて変化可能である（図に示したものは高さ 2m タイプ）。構成部材は、コンクリート、鋼材、石材および多孔質体（空隙率が制御可能）で、コンクリート製台型ブロックを 4 個連結し、中央に流動制御用のクロス鋼製パネルを装着する。これは、多方向からの流動制御を可能



図 1 自然エネルギー（潮流）を制御する人工魚礁

とするものである。流動制御パネルにより制御された流動場は、海藻の胞子や魚類が捕食する小型餌料生物および魚類卵・仔稚魚の滞留に有利な渦が発生させ、それらが構造物後方にまで広がることにより、好適な漁場環境を創り出す。ブロック間は鋼製傾斜フレームで連結され、海域で操業する際に問題となる網掛かりを抑制する形状となっている。また、石材に覆われた天井部は海底面への陰影面積を増加させ、魚介類の生息環境を整えることが可能である。

### 2. 1 流動制御機能の検証

流動制御機能を有する構造物設置に伴う渦流域および後流域の形成を視覚的に捉え、構造物高さに対する物質の滞留、着生へ及ぼす影響範囲を水理実験により検証した。実験は、香川大学工学部可変型開水路で行った。図 2、3 に示すように水槽内に構造物模型（実機スケール 1/25）を設置し、対象海域における任意の流速に対する湧昇域および後流域（滞留域、混合域）形成範囲について染料を流し込むことにより把握した。染料の移流・拡散状況について画像処理を行った後、構造物高さと同湧昇域および後流域との関係を定量的に評価した。また、既存の魚礁構造物では形状特性による流動場に与える影響

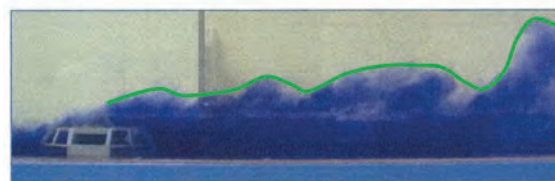
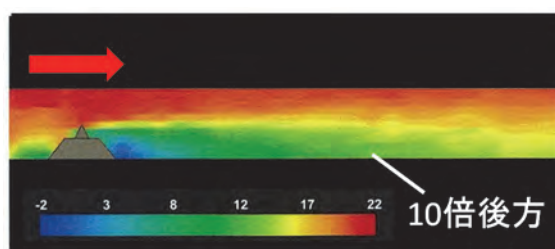


図 2 染料投入による人工魚礁模型を用いた水理実験

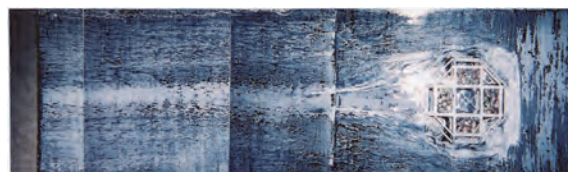


図 3 油膜法による人工魚礁模型を用いた水理実験

を評価した例は極めて少ないが<sup>5)</sup>、特に構造物内部での流動場の変化を可視化した例は無いと言っても過言ではない。そこで、油膜法（流動パラフィン、オレイン酸、酸化チタン）を用いた構造物周辺および内部の流動場の変化を可視化することを試みた。この方法は、渦の発生する箇所では、流れの滞留域が形成され、油膜が剥がれ難く白い部分が残るため、構造物周りの流れのパターンや渦の発生状況が可視化可能である。

## 2. 2 実海域での藻場造成効果の検証

藻礁用に香川県高松市沖に設置された構造物(投石礁、既存コンクリート礁、本人工魚礁)別に海藻繁茂量(着生本数(本/m<sup>2</sup>), 生産量(kg/基))を算出するとともに、海藻別の窒素含有量(乾燥重量に対する含有率%)に基づき、藻礁構造物別の窒素固定量を推定することとした。

毎年春先に行った本人工魚礁に関する藻場造成機能の調査では、ガラモ場の代表的な海藻種であるアカモク *Sargassum horneri*, シダモク *Sargassum filicinum* が優占しており、タマハハキモク *Sargassum muticum*, ヤツマタモク *Sargassum patens*, ヨレモク *Sargassum siliquastrum*, マメタワラ *Sargassum piluliferum* が確認できた。なお、これらの海藻は初夏までに流れ藻となって流出し、春先には再び安定した海中林を形成する(図4参照)。

平成18~20年の3~4月に実施した坪刈り調査に基づき、投石礁、既存コンクリート礁および本人工魚礁の基質面に着生した海藻類の現存量を調査した。なお、ホンダワラ類生産量は年間最大現存量に年間生産量と最大現存量の比を掛けて推定した。

坪刈り調査によれば、本人工魚礁の多孔質な基質部分に着生するホンダワラ類の単位面積当たりの着生本数は120.63(本/m<sup>2</sup>)であり、既存コンクリート礁の約2倍、投石礁の3倍強であった。平成21年4月の時点でも同様な繁茂状態であることが確認されている。本人工魚礁は、前述のように水理構造的に常時に潮流を制御することが可能であるとともに、海藻着生基質として使用した多孔質基質の微小な凹凸が、①海藻胞子の着生効果を高める、②藻食性ペントスの食害強度を抑制、③基質の目詰まりを抑制することから、既存技術に対して海藻類の着生機能が優れていた<sup>6), 7), 8), 9)</sup>。

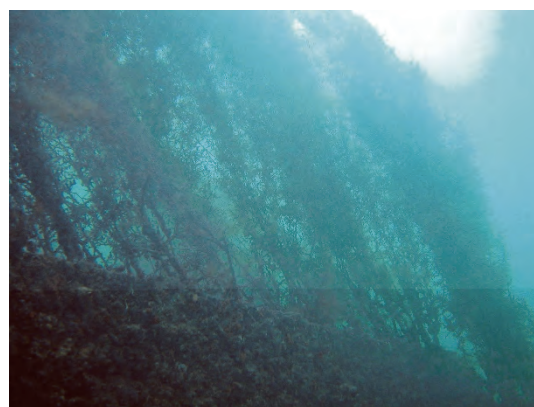
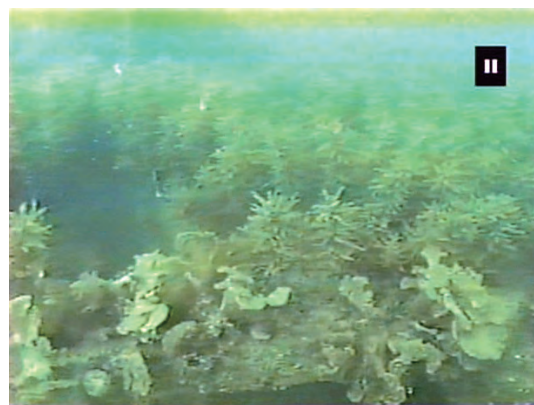


図4 海中林の形成状況

## 2. 3 窒素含有率及び窒素固定量

表1にホンダワラ類の種別窒素含有率<sup>10)</sup>、魚礁構造物別の1基当たりの窒素固定量、造成藻場内の藻礁構造物別の窒素固定量を示す。なお、視認調査により各藻礁にはアカモク、タマハハキモク、ヨレモク、ヤツマタモク、マメタワラの5種類のホンダワラ類が着生していたことから、窒素固定量の計算には表1に示す窒素含有率の平均値(1.55%)を用いた。各魚礁構造物の年間の単位面積当たりの窒素固定量は、既存藻礁0.28(kg/m<sup>2</sup>)、多孔質

表1 窒素含有率<sup>10)</sup>

ホンダワラ類の種類	窒素含有率(乾重量あたり)
アカモク	1.16 %
タマハハキモク	1.73 %
ヨレモク	1.67 %
ヤツマタモク	1.46 %
マメタワラ	1.73 %
平均	1.55 %

藻礁 0.57 (kg/m<sup>2</sup>), 投石礁 0.18 (kg/m<sup>2</sup>)となり, 投石礁, 既存藻礁と比べて, 多孔質藻礁の単位面積当たりの窒素固定量が大きく, 多孔質藻礁の窒素固定機能が優れていた。一方, 各魚礁構造物の規模は異なるが, m<sup>2</sup>当たりの事業費に換算するとほぼ同額になることから<sup>10)</sup>, 本人工魚礁>既存コンクリート礁>投石礁の順で経済的と考えられた。香川県高松市地先の造成藻場には, 既存コンクリート礁 60 基, 投石礁 8 基, 本人工魚礁 22 基が設置されており, 造成藻場におけるホンダワラ類による窒素固定量は, 既存コンクリート礁 198.81 kg, 投石礁 119.52 kg, 本人工魚礁 201.52 kg, 合計 519.85 kg と推計された。日本人の年間窒素排出量は 44kg/人年と言われており<sup>10), 11)</sup>, 造成藻場における窒素固定量は年間約 12 名分の生活排水浄化能力に相当すると言える。

## 2. 4 海藻群落の窒素固定による便益額

備讃瀬戸東部海域(高松市庵治地先)に造成された藻場を構成するホンダワラ群落で春から初夏に見られる流れ藻は, 0.18-0.57kg/m<sup>2</sup>の窒素を吸収固定した藻体が域外に流出する現象と解釈できる。栄養塩類の域外への排出を広義の水質浄化と捉えれば, 流れ藻は海域の水質浄化に寄与することになる<sup>12), 13)</sup>。そこで, 藻場造成による栄養塩類(窒素)の吸収固定による便益額について, 下水道整備費との比較検討を行った。

平成 18-21 年春季(3-4 月)の坪刈り調査結果から, 3 種類の藻礁構造物に繁茂するホンダワラ類は毎年同様の繁茂状況を示し, ホンダワラ類現存量は設置 1 年後と概ね同程度で安定していた。また, 既存コンクリート礁, 本人工魚礁, 投石礁のうち, 最も年間窒素固定量の多かった本人工魚礁 1 基の設置工事費は 838,725 円/基<sup>7)</sup>とされている。それに対して, 本人工魚礁 1 基当たりの年間窒素固定量から算定される便益額は, 窒素固定量 kg 当たりの年間下水道費用 25,984 円<sup>10)</sup>を用いて, 238,013 円/基となる。本人工魚礁を 22 基設置した場合, 設置工事費を差し引いた設置 1 年目の便益額(設置工事費一年間便益額)は-600,712 円/基となり, 22 基の総計では-13,215,664 円/年となる。設置後 2 年目以降は設置工事費が不要となるため, 設置 4 年目に便益額の総計が投資額(設置工事費)を上回り, 設置 5 年目以降は 5,236,286 円/年の便益

が期待できる。

年間窒素固定量から算定される便益額を単位面積当たりで計算すると, 本人工魚礁では, 14,811 円/m<sup>2</sup> と推計された。公共事業の費用対効果分析<sup>11)</sup>における便益の評価は, 割引率を用いて現在価値化される。そこで, 費用対効果分析の前提条件として, 施設設置工事は 1 年目のみ割引率を 5%/年, 施設の耐用年数は 30 年とされており, 香川県高松市地先の造成藻場を対象に費用対効果分析を行った結果, 本人工魚礁を用いた藻場造成の場合, 便益額総計は設置 4 年目から, 投資額を上回るようになる。

## 2. 5 実海域における底質改善機能の検証

本構造物は, 窒素の除去のみならず構造物自身の流動制御機能により, 水の鉛直混合を促進させ底質環境も改善できることが推定され, これまで不明であった実海域における検証実験を行った。構造物周辺の底泥における構造物の影響を把握するため, 泥サンプルを構造物の影響範囲内(実験区)と影響範囲外(対照区)の 2 地点で潜水して, またはエクマン採泥器によって採取し, COD, 硫化物, 酸化還元電位を分析した。本構造物の影響範囲は, 造物高さの 20 倍後方までであることが示されていることから, 構造物から 40m 以内の影響範囲内の地点と構造物から 60m 離れた十分に影響範囲から外れた地点を採取地点に選んだ。調査地点では, 潮流が下げ潮最強時には図 5 における流れの方向(東向き)に卓越することから, 調査点を実験構造物から東方向に設定した<sup>5)</sup>。

底質の COD については, 図 6 に示したように 2004 年 8 月の実験構造物を設置した直後に実験区での値が 18.5mg/g と対照区より高くなったが, その後同年 11 月には 13.9mg/g と急減し, 逆に対照区の値が 20.3mg/g と高くなった。2005 年以降は, 実験区の方が対照区よりやや低い傾向が続いたが, 2007 年 12 月の調査では, 実験区の平均値(4 地点の平均) 10.5mg/g がそれまでの対照区の平均値 15.0mg/g よりも有意に高い結果となった(Z-検定, 危険率 3%)。

硫化物は, 2004 年秋季以降, 実験区の方が対照区よりやや低い値を示した。また, 酸化還元電位は, 2006 年までは, 実験区と対照区の間で明瞭な差は認められなかつ

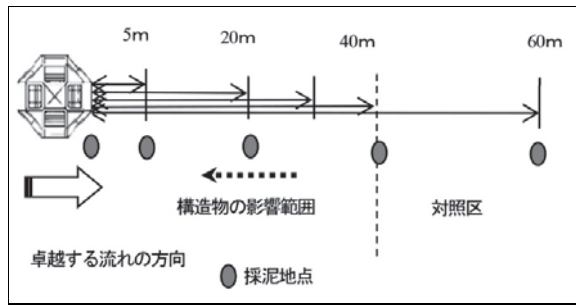


図5 実験構造物設置位置と採泥地点

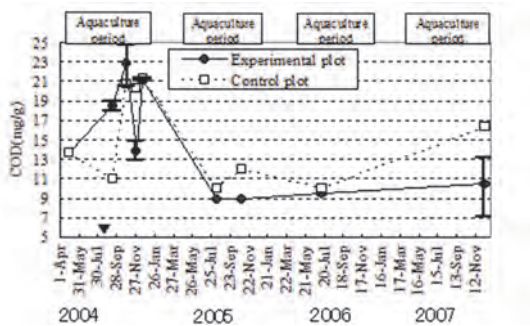


図6 底泥中のCODの変化 (▼：構造物設置日)

たが、2007年12月の測定結果において、実験区の平均値(4地点の平均)  $-111.25\text{mV}$  が、対照区のそれまでの平均値  $-205.4\text{mV}$  よりも、有意に高いことが確認された(Z-検定, 危険率1%)。

以上の結果から、本人工魚礁の影響範囲内の底泥では、範囲外のものに比べて、底質が改善されている傾向が見られた。本評価法は、2014年度から大阪湾で開始された漁場造成事業にも適用されている。

### 3. 大阪湾における実証実験

大阪府は、漁業振興策として、大阪湾北部から中部の海域に、攪拌機能を有する人工魚礁を設置し、海水の鉛直混合を促進し、貧酸素水塊の発生を軽減する試みを行っている。しかし、実海域における流動制御機能の可視化および定量的な評価とそれに伴う生物蛸集機能を関連付けた研究については、底質の巻き上げや流れの調査として行われている<sup>14)</sup>ものの、不明な点が多く成果の蓄積が期待されている。さらには、底質の巻き上がりや流れとの関連は、ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を用いた調査手法がある<sup>15), 16), 17)</sup>。

本実験では、多方向からの流れを制御可能な人工魚礁により生じる湧昇流、渦流の影響に伴う濁度の広がりに着目し、実海域における流動制御効果を確認するために、濁度計とADCPを組み合わせた2次元断面の新たな観測方法を試み、人工魚礁周りの濁度分布を可視化するとともに流動制御に伴う生物蛸集機能も検証した。

現地調査は、中潮の日の高低潮時前後に大阪府が岸和田沖に設置している人工魚礁3基を対象として行った。なお、調査内容は、人工魚礁近傍でのADCPによる曳航観測、水温、濁度、塩分の鉛直分布計測、および潜水士による目視確認(写真撮影・ビデオ撮影)とした。調査時の対象魚礁と航跡の位置関係を図7に示すように、対象とした人工魚礁それぞれについて、St. A~St. Cとした。また、対象とした人工魚礁3基は、攪拌専用礁1基、残り2基は攪拌機能を有し、かつ小型餌料生物培養礁として設置されている。

#### 3. 1 調査方法

本研究におけるADCP曳航観測は、調査船の船舷に専用架台を用いてADCPを固定することで行った。観測時

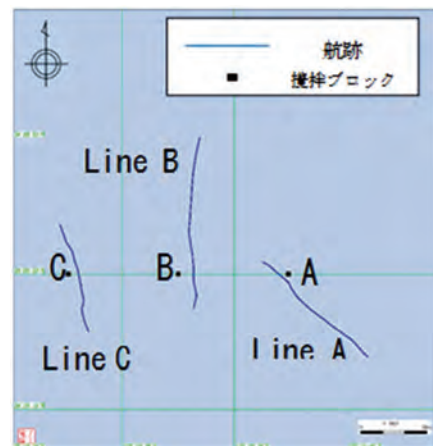
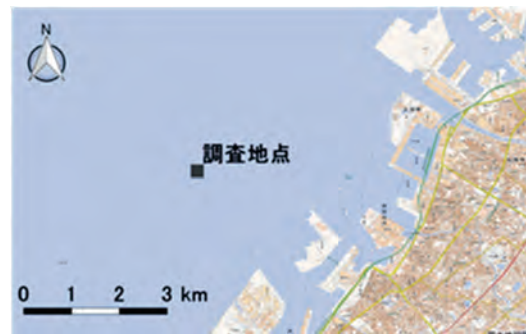


図7 調査位置図

の船位については、ディファレンシャル GPS を同期させ、取得した。ここで、曳航観測時の観測設定は、層厚 0.5m、層数 34 層、観測間隔 5sec で行った。水質鉛直計測は、多項目水質計を調査船舶上より垂下させることで水温、塩分、濁度の鉛直計測を行った。

### 3. 2 ADCP 観測結果からの濁度算出

上述の調査により得られたデータについては、水質調査データは各地点の鉛直グラフに、ADCP 曳航観測の結果は、流速値はコンタ図に、流向はベクトル図に整理した。併せて、水質調査で計測した水温、塩分、濁度の鉛直分布をもとに濁度に換算することで整理した。なお、ADCP 観測結果からの濁度算出は、曳航観測により得られた ADCP の反射強度から行った。ADCP の反射強度から濁度を算出する際には、式(1)で示す散乱強度の伝搬損失を考慮し、この結果を踏まえ、懸濁濃度を算出する必要があるが、懸濁濃度の算出には、水塊による音波の減衰吸収、粒子による音波の減衰、散乱領域である近距離音場における散乱も考慮する必要があることから、懸濁濃度の算出は、音響強度と懸濁態濃度の関係について伝搬損失を考慮した式(2)となる。

#### ①散乱強度の伝搬損失

散乱強度はソナー方程式から式(1)で示される。

$$EI = SL + SV + Const - 20 \log(R) - 2\alpha_w R \quad (1)$$

$EI$ :散乱強度(dB),  $SL$ :発射強度(dB),  $SV$ :粒子の後方散乱,  
 $\alpha_w$ :水の吸収係数(dB/m),  $R$ :トランスデューサーからの距離(m)

#### ②懸濁濃度の算出

ここでは、懸濁物質の影響と ADCP トランスデューサーの感度調整パラメータも含む。

$$M(r) = (K \langle P_{rms} \rangle r)^2 \frac{(\alpha_s) \rho_s}{(f)^2} e^{4r(\alpha_w + \alpha_s)} \quad (2)$$

$M(r)$ :トランスデューサーからの距離  $r$  における濃度,  $K$ :トランスデューサーに関する定数,  $P_{rms}$ :後方散乱強度,  
 $\alpha_s$ :粒径,  $\rho_s$ :粒子密度,  $\langle f \rangle$ :粒子の関数,  $\alpha_w$ :水の吸収係,  $\alpha_s$ :粒子の吸収係数

### 3. 3 水質計測結果

多項目水質計により水質を観測した結果、水温、塩分については、St. A~C の全地点で同様であったが、濁度

については、St. A でのみ水深 5m 以深にて、他の地点に比較すると、変動している傾向が確認された。また、St. A では水深 11m 以深で密度も大きく変動していることが確認された。また、濁度換算の結果、濃度変化が確認された Line A の拡大図を図 8 に示す。図中に表記している単位 (ABT) は、超音波後方散乱方式で計測した濁度を示しており、横軸は観測開始地点からの曳航距離を、図中の水深 15m 以深の塗り潰し部分は海底を示している。図中の■は、人工魚礁を模式的に示したものである。図 8 より、人工魚礁近傍で、その約 10m 前面から徐々に濁度が高くなり、魚礁近傍では魚礁高 2m に対して、海底面上 4m 程度まで濁度が高くなっており、その後、魚礁背面の約 5m まで徐々に低くなる状況が面的な結果として確認された。図 9 に岸和田の潮汐図を示すように、観測時間帯の潮位差は約 0.3m と、当日の最大潮位差約 1.0m に比べると小さく、潮汐流が小さかったと考えられるにも関わらず、魚礁により湧昇流が発生し、それに伴い濁度が高くなったものと考えられる。

### 3. 4 生物蛸集目視観察結果

潜水目視観察については、2013 年 7 月、2014 年 6 月、同年 9 月の計 3 回実施した結果を紹介する。

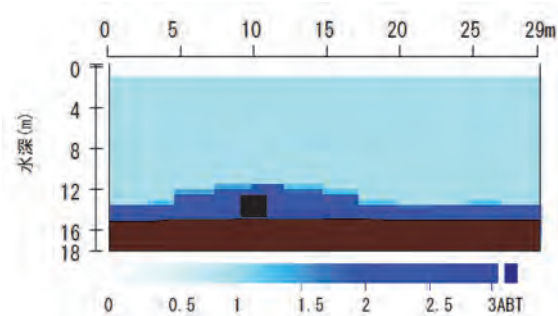


図 8 St. A の濁度巻上り状況

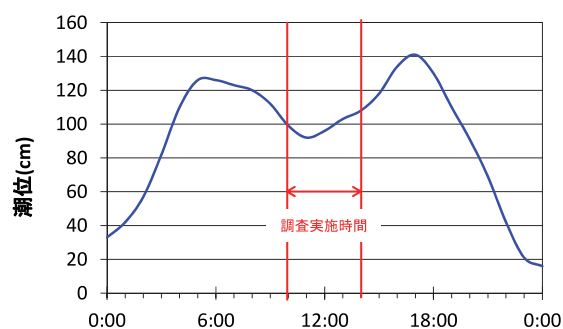


図 9 岸和田の調査当日の潮汐

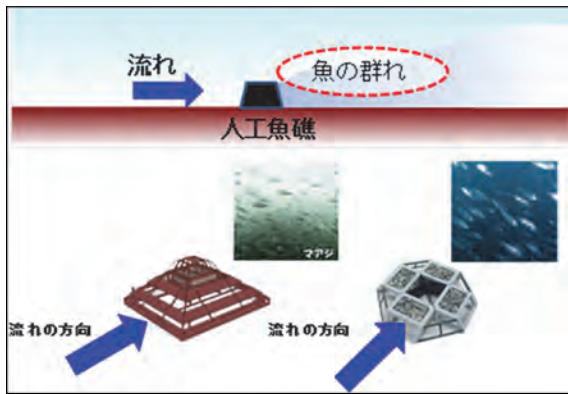


図10 目視観察結果

2013年7月に実施した潜水目視調査時には、どの人工魚礁においても魚礁後方(流れの下手側)に体長5~10cmのマアジ、イサキ、カタクチイワシの群れが滞留し、巻上げられた餌料を捕食する行動が確認された。

また、人工魚礁内部では、コショウダイ、イシダイ、カワハギ、魚礁底部では、メバル、クジメ、カサゴ、キジハタ等の岩礁性魚類も蝟集していた。この傾向は、2014年6月、同年9月における調査時においても同様の魚種、蝟集量が確認されており、人工魚礁設置に伴う安定した魚類蝟集機能が発揮されていることが検証された。

付着生物については、魚類の有用な餌料となる甲殻類(ヨコエビ類)、多毛類(カンザシゴカイ)の着生が確認されており、魚類の餌料環境も整備されてきていることが分かった。魚類蝟集場所と人工魚礁との位置関係を模式的に示したものを図10に示す。

### 3.5 大阪湾における底質環境改善機能の検証

大阪湾での現地調査の結果、試験礁区に設置されている人工魚礁近傍では、底質のCODが環境基準値以下に保たれているが、人工魚礁から距離が離れるにつれ、底質のCOD値は高くなり、環境基準値を満たしていない状況が確認された(表2、図11参照)。図12に夏期に

表2 COD分析結果

	対照区A	対照区B	対照区C	対照区D	試験礁区
試験礁からの距離(m)	150	100	50	20	0
COD(mg/g)	34.3	22.3	23.2	15	10

おけるDOの鉛直分布の一例を示す。試験礁区での各人工魚礁近傍でのDOは、いずれの調査時においても対照区に比べて有意に高い値となっていた。これは、人工魚礁の流動制御機能による底層部での鉛直混合が発生し、それによる底質の巻上げ、酸素供給に伴う有機物の分解が促進されCOD値が改善されていると考える。

### 3.6 底質改善による費用対効果

既往の研究の中で、人工魚礁の機能の定量化を行うにあたって、COD値の差分を水質・底質浄化の費用対効果として、下水処理費用に換算して評価する手法があるが、本手法を人工魚礁設置後に適用し、実海域における環境改善機能を評価した例は極めて少ない。そこで、人工魚礁設置に伴う底質改善による費用対効果を評価するために、底質のCOD値に着目して検討した<sup>11), 12), 13)</sup>。

検討の結果、底層流10cm/secとした場合、構造物1基による底質改善可能範囲は、影響範囲が二方向のみとした場合、112.0 m<sup>2</sup>になる。次に、現地調査結果から、構造物のCOD除去機能は、底泥1kg(湿重量)あたり5~10g(平均7.5g)のCOD除去の実績があるので、底泥の

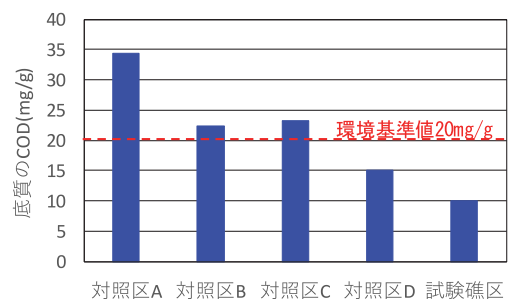
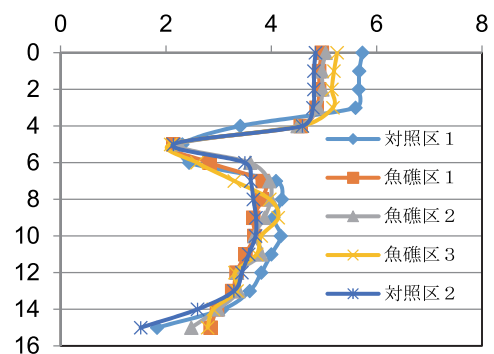


図11 大阪湾における底質のCOD分析結果



DOの鉛直分布 (mg/l: 2013 7.30)

図12 大阪湾におけるDOの鉛直分布の一例

採取深さを平均 17.5cm とした場合 294.0 (kg-COD), これに、有機物処理量に相当する下水道費用 5,584 (円/kg-COD) を乗じると約 165 万円となる。構造物 (大阪湾タイプ) の製作費, 沈設費で 1 基当たり, 130 万円とすると,  $B/C=1.27$  となる。ただし, 今回は, 構造物の影響範囲を二方向のみとした場合評価であり, これを四方向として考えると, 処理量は 2 倍となり,  $B/C$  も 2 を超える。

また, 試験礁区と対照区での COD 濃度の差が最大 5mg/g に着目し, 費用対効果を試算すると, 試験礁区の人工魚礁 1 基当たりの往復流(二方向)での処理量では, 処理費用が約 446 万円となり,  $B/C=3.43$  となる。

#### 4. 検討結果と考察

人工魚礁背後の流れは, これまでの研究成果により, 断面平均流速が 8cm/sec 以上であれば, 湧昇域, 後流域の影響範囲は確保されることが確認されている。

このことから, 今回, 大阪湾に設置されている人工魚礁は, 海水を攪拌することにより海水の混合促進, 栄養塩拡散, 酸素供給が期待される。本調査結果は, 人工魚礁設置に伴う攪拌流の発生とそれに伴う濁度の巻上りが確認されたものと考えられる。

ここで, Line A, Line B, Line C のそれぞれの流速分布を図 1 3 に, 流速ベクトル図を図 1 4 に示す。

図 1 3 より, 調査時の海域の流況は, 流速は表層で 30cm/sec 程度, 中層, 下層では 10~20cm/sec 程度である。ADCP の性質上, 海底面近傍はデータを取得できないが, 下層での流速が 10~20cm/sec であることから, 海底面近傍では概ねそれ以下の流速となっていることが推察される。ここで, 図 1 3 より調査当日の各測線における流向は, 南西向きの流れとなっている。なお, 図中の●は, 各魚礁設置地点である。

藤原ら<sup>18)</sup>は, 大阪湾北東部では東岸恒流帯と呼ばれる密度流が存在するとしている(図 1 4)。また, 調査時の風況は, 風速 10m/sec 未満, 風向は北北西, 北西の状況であった。

したがって, 観測で得られた各測線の流向流速は当該海域の流況に該当するものと判断できる。

以上のことから, 人工魚礁の西側を曳航した Line A では湧昇域, 後流域の濁度の巻上りを観測することが出来たが, Line B, Line C の測線では, 曳航測線が人工魚礁東側を曳航したため, 湧昇域, 後流域に発生している濁度の巻上がりも南西に流れているものと考えられることから, Line A で確認されたような人工魚礁による濁度の巻上りの現象を捉えることができなかったものと考えられる。この観点から, St. A, St. B, St. C のそれぞれの塩分鉛直濃度の一覧を整理し, 濃度差の確認を行った。その結果, St. A では水深 10m 以深(海底面上 50m 以上)の層で塩分濃度が生じており  $0.224(g/m^3)$  の差が生じている。St. B, St. C でも St. A と同様に水深 10m 層とそれ以下の下層でデータの比較を行うと, St. B では 0.191, St. C では 0.099 の密度差が生じていることが確認された。

このことから, St. A (Line A) で捉えた濁度の巻上がりは, 湧昇流が発生し, 混合が生じていることによるものと判断できる。

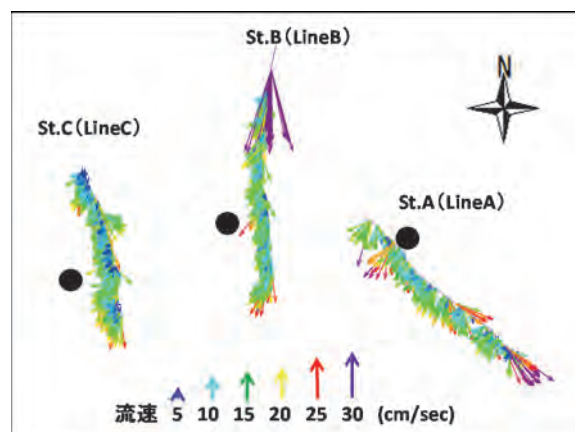


図 1 3 各測線の流速ベクトル

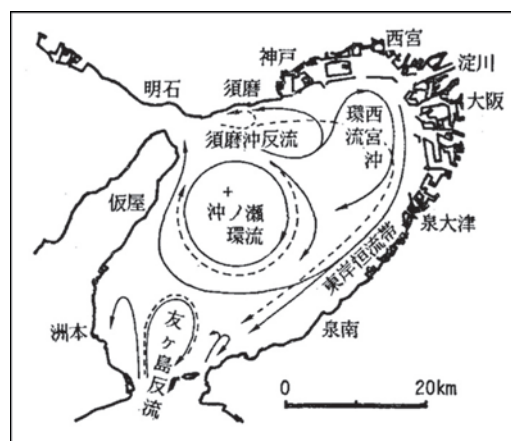


図 1 4 大阪湾の恒流系<sup>18)</sup>



## 5. まとめ

本研究では、多方向からの流れを制御可能な人工魚礁により生じる湧昇流、渦流の影響に伴う濁度の広がりに着目し、実海域における流動制御効果を確認するために、濁度計と ADCP を組み合わせた 2 次元断面の新たな観測方法を試み、人工魚礁周りの濁度分布を可視化するとともに流動制御に伴う生物増集機能を確認できた。

近年、頻発する海域環境問題により、生物生息環境の悪化に伴う資源生産力の低下が懸念されているが、窒素やリンは生物が生長・生殖する際に必要不可欠な栄養素であり貴重な資源でもある。富栄養化対策として栄養塩を取り除く方法は色々と試みられているが、貴重な資源である栄養塩をただ取り除くのではなく、自然界の物質循環のサイクルに乗せてやるような方法をとる事が重要であると考えられる。その点でも藻類を利用した水質浄化技術は、元来海が有してきた自浄作用を活用したものであり、自然界の物質循環に沿ったものであるため環境負荷が低いものと考えられる。本人工魚礁は、流動制御機能により底質を改善・維持し、藻類のみならず、小型のエビやカニ等の甲殻類に代表される選好性餌料生物や魚類にとっても良好な環境を形成することができるため、既存技術に比べ生物親和性に富んだ構造物となっていると言える（図 1 5、1 6 参照）。

今後の漁場造成においては、人工魚礁の影響範囲を定量的に評価し、漁場造成規模に応じた構造物配置および適正基数を検討する必要があると考える。

現在、香川大学では、瀬戸内圏研究センター、工学部、農学部と香川県水産試験場および地域の企業で構成される研究 G により、「魚類廃棄物の再利用による水産資源生産力向上技術の開発」を行っており<sup>19)</sup>、悪化した海域環境を高度に改善する新基質の開発も行っている。これらの技術が、本来の海のあるべき姿を取り戻すために資する技術となることを願って止まない。

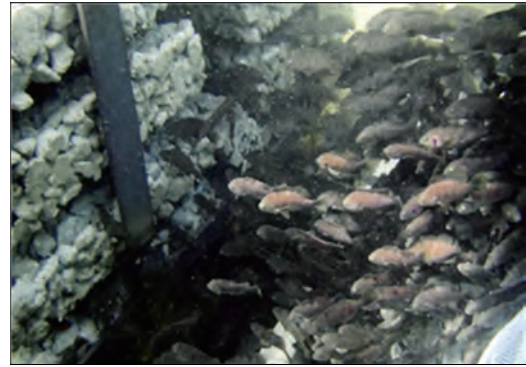


図 1 5 人工魚礁に集まる魚たち（本人工魚礁に稚魚の保護シェルターを搭載）



図 1 6 人工魚礁に集まる魚たち（魚礁上部の稚魚群）

## 謝辞

本研究の遂行に当たり、多大なるご協力、ご理解を戴きました大阪府環境農林水産部水産課、大阪府漁業協同組合連合会、香川県漁連、㈱日本ミクニヤ、攪拌ブロック礁技術研究会の関係諸氏に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) <http://www.seto.or.jp/seto/index.htm> (瀬戸内海の環境情報)
- 2) 中国四国農政局高松統計・情報センター編集：第 52 次香川水産統計年報，社団法人香川農林統計協会，pp.15-35，2006.
- 3) 中澤公伯，岩下圭之，大木宜章，宮崎隆昌，神野英毅：広域空間情報による藻場形成要因の把握と利活用に関する一考察，沿岸域学会誌，Vol.21，No.4，pp.81-96，2009.

- 4) 京都府立海洋センター編著：ホンダワラ藻場の環境浄化機能，季報第 86 号，pp.1-12，2006.
- 5) 宮川昌志，末永慶寛，山岡耕作，松島学，堀田健治：流動制御構造物による海域底質改善技術，生態工学会誌 *Journal of Eco-Engineering*, Vol.20, No.2, pp.67-78, 2008.
- 6) 安岡かおり・山中稔・末永慶寛・松山哲也・星野高士・竹田弘之・白木渡：スラグを利用した多孔質基質による海域改善技術に関する研究，漁場造成技術，第 1 巻第 1 号，pp.23-28，2004.
- 7) 株式会社クロシオ：Sea Mark Reef パンフレット，pp.2-4，2006.
- 8) 末永慶寛，河原能久，山本直樹，田中陽二：海域生物環境改善技術の開発，土木学会論文集，環境部門 No.755/VII-30，pp.29-36，2004.
- 9) 安岡かおり，末永慶寛，松島学，増田光一：閉鎖性海域における水産養殖からの負荷を考慮した環境影響評価に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 618 号，pp.123-129，2007.
- 10) 香川県水産課：ガラモによる水質浄化便益額報告書，pp.1-2，2006.
- 11) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤整備事業費用対効果分析のガイドライン（暫定版），pp.1-90，2002.
- 12) 伊藤靖，中野喜央，松下訓，三上信雄，横山純，桐原慎二，能登谷正浩：藻場による炭素固定量の試算，水産工学，Vol.46，No.2，pp.135-146，2009.
- 13) 末永慶寛：瀬戸内海の藻場造成と環境負荷低減に関する研究，平成 19 年度地域貢献経費による研究報告書，香川大学，pp.33-42，2008.
- 14) 大竹臣哉，山本康介，小池志門，大西謙吾，大門伸之：天然礁の鉛直混合効果に関する研究，平成 26 年度日本水産工学会学術講演会学術講演論文集，pp.75-78.
- 15) Takehiko Hiwataria, Kunio Shirasawa, Yasushi Fukamachi, Ryuichi Nagata, Tomoyoshi Koizumi, Hiroshi Koshikawa, Kunio Kohata: Vertical material flux under sea-sonal sea ice in the Okhotsk Sea north of Hokkaido, *Japan, Polar Science*, Vol.2, Issue 1, pp. 41-54, 2008.
- 16) 橘田隆史，横山洋，橋場正弘，新井昴：ADCP の超音波反射強度を利用した濁度計測技術について，河川流量観測の新時代，第 2 巻，2011 年 8 月.
- 17) M. Shulkin and H. W. Marsh: Sound absorption in seawater, *Journal of Acoustic Society of America*, 34, 1962, pp.864-866.
- 18) 藤原建紀，肥後竹彦，高杉由夫: 大阪湾の恒流と潮流・渦，海岸工学論文集，第 36 巻，pp.209-213，1989.
- 19) 亀山剛史，松山哲也，安岡かおり，掛川寿夫，末永慶寛：有害金属吸着機能を有する新規多孔質コンクリートの開発，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.68, No.2, pp.570-575, 2012.