

過栄養化した閉鎖性水域に造成した 干潟に作用する物理的攪乱の影響評価

EVALUATION OF THE EFFECT OF PHYSICAL DISTURBANCE OF MANMADE TIDAL FLAT IN ENCLOSED WATERS SUBJECT TO HYPERTROPHY

石垣 衛¹・中村由行²・上月康則³・上嶋英機⁴

Mamoru ISHIGAKI, Yoshiyuki NAKAMURA, Yasunori KOZUKI, Hideki UESHIMA

¹正会員 博(工) 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

²正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 博(工) 徳島大学大学院 工学研究科 (〒770-8560 徳島県徳島市南常三島 2-1)

⁴正会員 工博 独立行政法人産業技術総合研究所 産官学連携部門 (〒737-0197 広島県呉市広末広 2-2-2)

Coastal zone of Osaka Bay, reclamation continued since Japan's high-growth period has eliminated most of the tidal flats, creating an area in which natural natural purifying effect have become insufficient. Restoration of the coastal environment in such areas requires reduction of flowed-in load, of course, but also necessitates purifying of the water, restoration of the biotic community, and the functions of tidal flats. This study, with the ultimate objective of restoring the coastal environment of the Osaka Bay, built test tidal flats to evaluate the function of such areas. In the inner reaches of Osaka Bay, currents and waves and other means of physical disruption are minimal so we focused on the effect that situation would have on our experimental tidal flats.

Key Words : *Enclosed water, hypertrophy, tidal flat, physical disturbance, environment restoration*

1. 緒論

大阪湾奥の沿岸域では、高度成長期以降の大規模な埋立により多くの浅海域が消失し、自然浄化能が低下した海域が形成されている。このような海域の環境修復には、陸域からの流入負荷対策はもとより、水質浄化や生物生息場としての干潟等の浅海域機能を再生することが望まれている。大阪湾奥に位置する尼崎港は昭和初期から大規模な埋立が進み、閉鎖性の強い海域が形成された場所である。港内は、運河や処理場を通じて陸域からの負荷が流入し続け、水質・底質が悪化しており、港内底層部では夏季に強い貧酸素水塊が形成されている。このような尼崎港において、2001年度より港内の環境修復を目的とした各種技術の実証実験が実施され、各技術の最適な組み合わせによる港内の環境修復効果が検証されている^{1) 2)}。

本研究では、尼崎港内に水質浄化と多様な生物生息空間を創出することを目的に人工干潟を造成し、追跡調査を実施することで、その効果を評価した。ここで、尼崎港内は過栄養化であり、港湾構造物等により波浪が制御されていることから、静穏性の高い海域となっている。そこで、造成した干潟に作用する物理的攪乱と形成される生物相の連関に着目した評価を実施した。

2. 実験施設および調査概要

(1) 実験施設

実験施設は、図-1に示す尼崎港内の南西域の隅角部に造成した。施設の形状・規模を図-2に示す。施設は長さ35m、幅12m、勾配1/50とし、当該域が軟弱地盤のため、沈下による地形変化を最小にすることを目的に、既設の緩傾斜護岸の上に載せる方式で造成した。尼崎港内は直立護岸に囲まれた海域であることから、創出する干潟のコンセプトを磯場の延長にある砂質干潟とし、有用種であるアサリの生息に適した造成材(中央粒径:0.5mm、砂泥分:砂80%、泥20%)を選択した。また、干潮時にも干潟総面積の1/3が冠水するように地盤高を設定した。

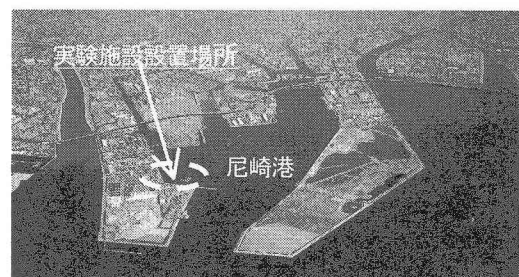


図-1 尼崎港位置図および実験施設設置場所

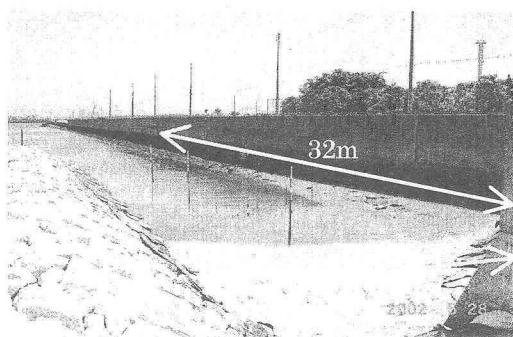


図-2 人工干潟実証実験施設

(2) 調査方法

人工干潟実証実験施設の初期動態の把握を目的に、施設造成直後から約2年間（2002年4月～2004年2月）の地形形状・底質・底生生物の変化について定期的に追跡調査を実施した。また、干潟に作用する物理場と生物相の連関を把握するために、干潟内外域の波浪・干潟表面の流速および、干潟生物の面的分布について集中調査を実施した。

定期調査の頻度は、地形・底質について1回/月とし、底生生物は四季調査（4回/年：5月、8月、11月、2月）とした。一方、集中調査は2003年10月1日～10月8日の8日間に渡って波浪計測、流速計測、生物の面的調査を実施した。

a) 地形形状

図-3に示すように、干潟域に●印で示した107測点を設置し、水準測量によって地形の経時変化を把握した。基準面は、尼崎港内における潮位観測結果をもとに大阪港工事基準とした。

b) 底質調査

図-3に示す St.1～St.5の5地点で干潟表層下約20mm層までを採泥した。採取試料は、粒度組成、全有機炭素量（TOC）、酸揮発性硫化物濃度（AVS）の各分析に供した。粒度は、粘土分（ $5\mu\text{m}$ 以下）、シルト分（ $5\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$ ）、細砂分（ $0.075\text{mm}\sim 0.25\text{mm}$ ）、中砂分（ $0.25\text{mm}\sim 0.85\text{mm}$ ）、粗砂分（ $0.85\text{mm}\sim 2\text{mm}$ ）、礫分（ 2mm 以上）の6分類の値を求めた。全TOCおよび、AVSは底質の調査・試験マニュアル（底質浄化協会、1995年）に基づき分析した。

c) 付着藻類・底生生物調査

先の図-3示した底質の採泥地点（St.1～St.5）と同一の場所において定期的に付着藻類・底生生物調査を実施した。付着藻類の調査は、付着藻類を底質とともに採取し、chl.aをアセトン抽出し分析することで現存量を求めた。底生生物調査は、 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ のコドラードを用いて採取した泥を目あい1mmの篩に通し、篩に残った試料を分析室にて測定した。測定項目として種の査定、生物種類別個体数、湿重量を設定した。また、図-4示す、人工干潟域の▲印で示した12地点で底生生物を集中調査することで干潟域の面的な生物分布を求めた。調査手法・項目は前述の底生生物の定期調査と同様とした。

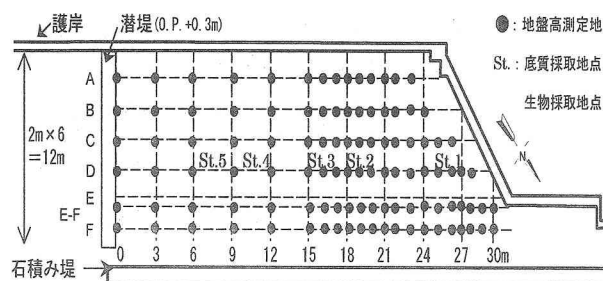


図-3 定期調査地点

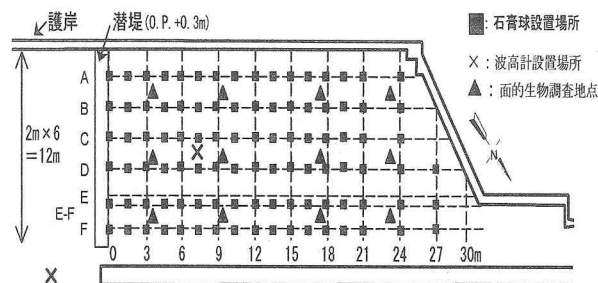


図-4 集中調査地点

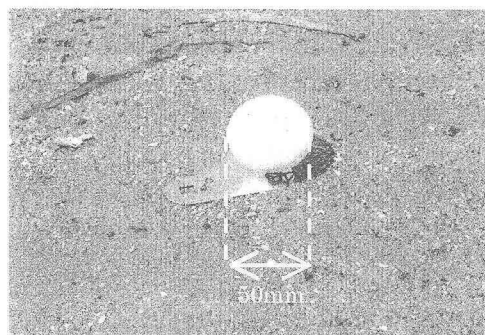


図-5 石膏球および設置状況

d) 波浪計測

図-4に示す X印（干潟内外の各1地点）に波浪計（WAVE HUNTER99 MODELWH202：アイオーテック社製）を設置し、港内波浪が干潟実験施設に伝播する状況を計測した。ここでは、観測期間中の最高波（ H_{max} ）、最高波周期（ T_{max} ）、有義波（ $H_{1/3}$ ）、有義波周期（ $T_{1/3}$ ）を求めた。

e) 干潟表面の流速の計測

図-4に示すように、干潟域に■印で示した83地点に図-5に示す石膏球を設置することで海域の乱れにて生じる流れを計測した。ここで、石膏球は直径50mmの球状のものを用いて、 $\phi 5\text{mm}$ のステンレス棒にて干潟に固定し、干潟表面近傍の流速を測定した。

3. 調査結果および考察

(1) 地形形状の変化について

2002年3月から2003年11月までの約2年間に実施した地形測量結果より、人工干潟の基準面からの地盤高の変動量を求めた。図-6に施設の縦断方向の中

心断面における地盤高の経時変化を示す。図は、2002年3月、4月、8月、11月、および2003年2月、4月、8月、11月の結果を抽出して示したものである。人工干潟の地形変化について、造成直後の2002年3月の断面を基準とすれば、約半年後の8月末には砂留め潜堤背後から9mまでの範囲で最大約20cmの地形変化が確認された。また、1日を通じて最も波当りの時間が長いと推定される潜堤から18m以上離れた地盤においても、約10cm～20cmの地形変化が確認された。しかし、潜堤からの距離が9m～18mの範囲の地盤では、造成当初に設定した高さに比較して1cm～2cmの地形変化で収まっていることから、測量誤差を考慮した場合、地盤はほとんど変動していないと考えられる。

(2) 底質の経時変化について

施設造成後の2002年4月～2003年11月までに、前掲の図-3に示すSt.1～St.5にて採泥を行い、各地点における粒度分布の経時変化を求めた。図-7に干潟内の粒度分布の経時変化を示す。ここでは、図-6にて求めた地盤高の変動より、地形変化の大きいSt.1と地形変化が少なく安定しているSt.4の粒度分布変化を示す。地形変化の大きいSt.1では、造成後2ヶ月経過した平成14年5月より、St.4に比較して粗砂分の割合が多くなる傾向を示した。また、シルト・粘土分がほとんど無く、粗粒化が進行していると考えられる。一方、St.4では、造成後8ヶ月経過した平成14年11月までは、粗粒分の変化の割合は小さく粒度も安定しており、シルト・粘土分も若干であるものの増加傾向にあった。しかし、1年後の平成15年11月には、シルト分の割合は変化しないものの、礫分の増加

傾向が確認された。これは、平成15年の春～夏においてイベント的に干潟の細粒分が消失する現象が生じ、その後、安定した地形の効果により、沈降堆積物等によってシルト分が供給されたためと考える。

図-8に各St.におけるTOCの濃度経時変化を、図-9にAVSの濃度経時変化を示す。TOCについて、各St.ともに増加傾向を示す結果を得た。特に、St.2～St.4の地点では、平成14年11月に比較して、翌年の11月には約1.5倍～2倍の量に増加している。これは、地形形状の安定にともない、有機物の沈降堆積が促進されたことや、後述にて示す付着藻類が安定して増加していることが寄与したためと考える。一方、AVSは、各St.とも平成14年11月まで低い値を示したものの、翌年の11月にはSt.3～St.5にて大幅に増加する傾向が確認された。これは、前述のTOCが増加したことに加え、St.3～St.5は干潟の干出時間が短く、好氣的な状況になり難いために、St.1、St.2に比較して底質の還元化が進行したためと考える。

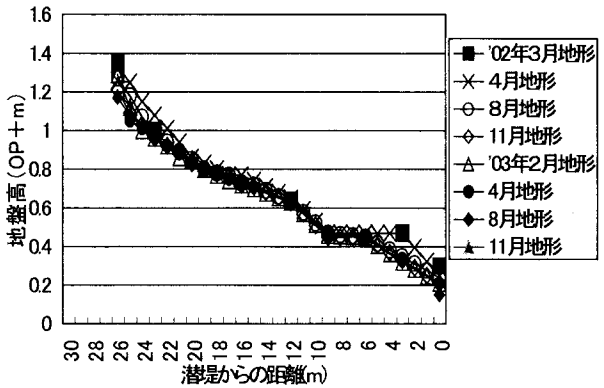


図-6 干潟地形縦断面の経時変化

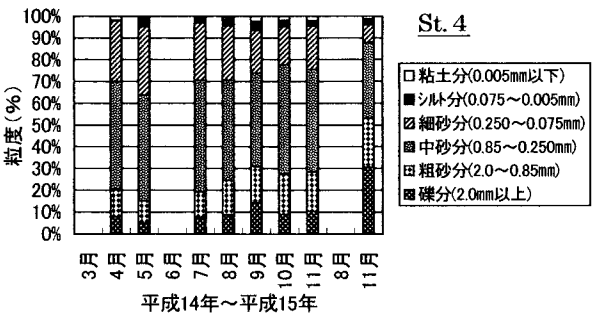
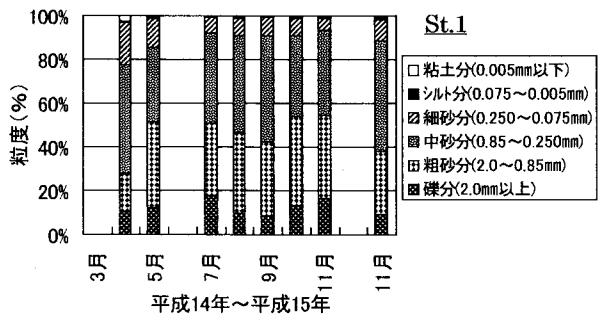


図-7 干潟造成材の粒度の経時変化

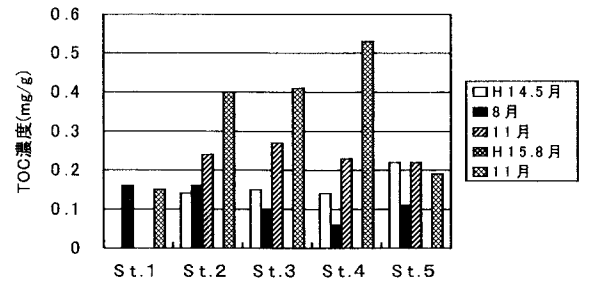


図-8 底質の変化 (TOC)

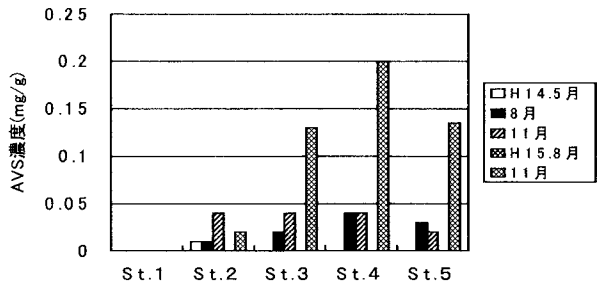


図-9 底質の変化 (AVS)

(3) 付着藻類の経時変化について

図-10 に各 St. で採取した付着藻類の現存量を Chl.a 濃度で表し、その経時変化を示す。付着藻類は、St. 2～St. 5 で増加傾向にあり、St. 1 では発生が少ない結果を得た。これは、St. 1 は干出時間最が多いことおよび、汀線として波当たりの影響を最も長い時間受けることから、付着藻類が定着し難いためと考える。一方で、St. 3, St. 4 は、ある程度の水深が保たれていることと、地形変化が少ないことから付着藻類が安定して増加すると考えられる。この様な付着藻類の増加は、干潟の一次生産を向上させることで水質浄化や底生生物の餌場として生物多様性に大きく寄与することが知られている。しかし、付着藻類の発生量は、前掲の図-8、図-9 に示した TOC 濃度、AVS 濃度と相関が高く、当該過栄養化域では、過剰に増えることで有機物を干潟域に蓄積することが懸念される。

(4) 底生生物の経時変化について

図-11～図-12 に底生生物の定期調査結果を示す。各 St. とも種類数は増加傾向にあった。個体数については、8 月以降に軟体動物（二枚貝類）が優占種となった。軟体動物の個体数は、水深が深い場所では増加傾向を示し、浅い場所では減少傾向を示していた。ここで、軟体動物はほとんどがイガイ科（ホトトギスガイ）とマルスダレガイ科（アサリ）で構成されていた。

これは、尼崎港内が過栄養化であることから過剰な懸濁物が存在することで、二枚貝に良好な餌場となっているためと考える。平成 15 年 10 月に実施した底生生物の集中調査結果のうち、干潟に出現したホトトギスガイとアサリの個体数および、湿重量を図-13、図-14 に示す。ここで図は、前掲の図-4 で設定した▲印について、各縦断面（B 断面、D 断面、E-F 断面）に沿って個体数、湿重量を示したものである。図より、各断面のアサリの個体数、湿重量は、ホトトギスガイの個体数、湿重量の変化に相関が高く、ホトトギスガイの個体数、湿重量が大きい断面で小さな値を示し、小さい断面で、大きい値を示す傾向を得た。この結果は、アサリの生息場を目的に造成した当該干潟において、ホトトギスガイが優占することで、アサリの生息環境を阻害する傾向を示していると考えられる。

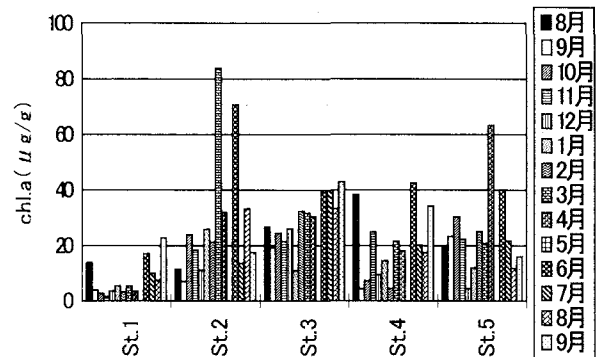


図-10 付着藻類の経時変化

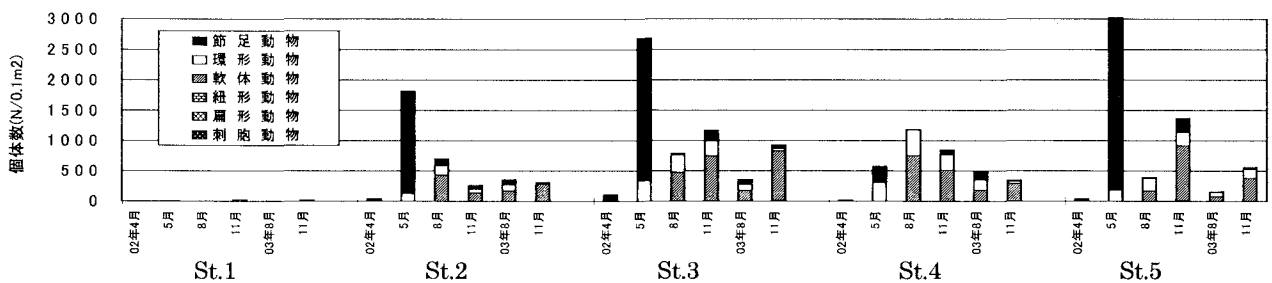


図-11 底生生物個体数の経時変化

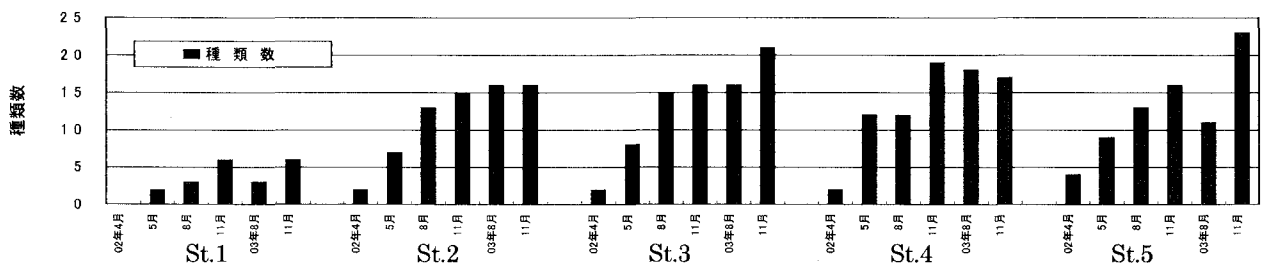


図-12 底生生物出現種数の経時変化

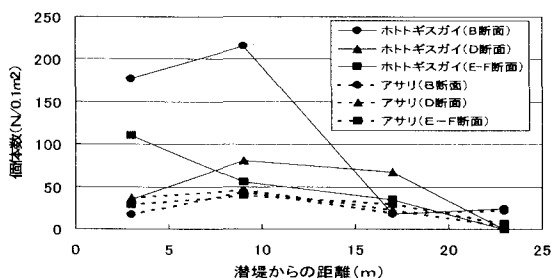


図-13 ホトトギスガイとアサリの個体数の関係

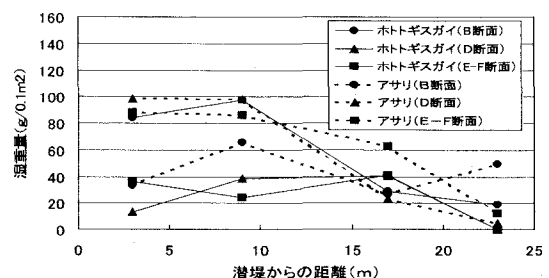


図-14 ホトトギスガイとアサリの湿重量の関係

(5) 干潟に作用する波浪について

前掲の図-4にて示した干潟外域の波高計にて尼崎港内の波浪を計測した結果を表-1に示す。表中の値は、8日間の計測期間における最高波高 ($H_{\max}$)、最高波周期 ($T_{\max}$)、有義波高 ($H_{1/3}$)、有義波周期 ($T_{1/3}$)を示したものである。観測期間中を通して、最高波高の最大値は44cmであり、最高波高が30cmを越えるようなとき、有義波高も僅かに大きくなった。また、観測期間中の有義波高は約10cmであった。有義波周期は4秒を超えることはなかった。

図-15に、計測期間中の平成15年10月2日15:27分頃の波形を示す。図より、干潟外域と干潟内域の波形が対応していることから、干潟外域で観測された波の多くが干潟内域へ伝播していることが推定される。ここで、波形の経時変化は、15:27頃に有義波高の約2倍程度の波が約15秒遅れて干潟へ進入し、その後約5分程度波形が乱れていた結果を得ている。このとき、小型の船舶が沖を航行していたことを確認した。

以上の結果から、尼崎港内における有義波高は小さい値であったものの、港内を航行する船舶の航跡波が、干潟にイベント的に伝播することが示された。このような物理的外力が、前節までに示した干潟の地形、粒度の決定に大きく作用し、干潟に形成される生物相にも大きな影響を与えていることが示唆される。

(6) 干潟表面の流速について

干潟に伝播する波浪等によって生じる流速の有効な計測手法として、長時間にわたる平均的な流れの強さと多地点で同時測定が容易に行える点に着目し、Komatsuら³⁾が提唱する石膏球法を用いた。当該手法を用いた流速の求め方を以下に示す。

まず、石膏球を現地で30分間海水に浸漬し、表面の余分な水分を拭取った後に湿重量 W_1 を計測する。その後、各計測地点に石膏球を設置し、4潮汐周期間の経過後に石膏球を引き上げ、表面の余分な水分を拭取った後に湿重量 W_2 を計測する。流速は W_1 と W_2 の値を用いて、川俣ら⁴⁾が求めた、以下の平均流速 V の算定式より求める。

$$V = \left\{ 1 - \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{1-k} \right\} / \{ (1-\kappa)\beta\tau \} - \alpha / \beta$$

ここに、

$$\alpha = a + bT$$

$$\beta = d + eT$$

τ : 石膏球の浸漬時間、 T : 水温

上月ら⁵⁾は、上記の式について室内実験と現地実験より α 、 β について塩分と水温の影響を考慮して以下の式を導いている。

$$V = \left\{ 1 - \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{0.485} \right\} / \{ 0.485\beta\tau \} - \alpha / \beta$$

ここに、

$$\alpha = (-1396 + 52.2 \cdot S + 290.8 \cdot T)$$

$$\beta = (-2090 + 69.05 \cdot S + 130.4 \cdot T)$$

S : 塩分濃度、 T : 水温

上月らの算定法を参考に、現地の水温、塩分を計測し、当該人工干潟表面に作用する流速を求めた結果を図-16に示す。図より、石膏球法を用いた計測により得られた流速は、干潟の広範囲で2cm/s~2.5cm/sの値を示した。ここで、海域の乱れを最も受けやすい潜堤背後域および平均水深時に碎波帯となる潜堤から24m~27mの地点で流速は最も速くなり、約4cm/s~4.5cm/sの値を得た。

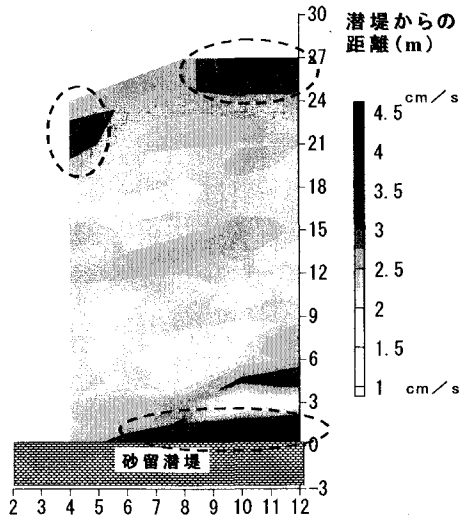
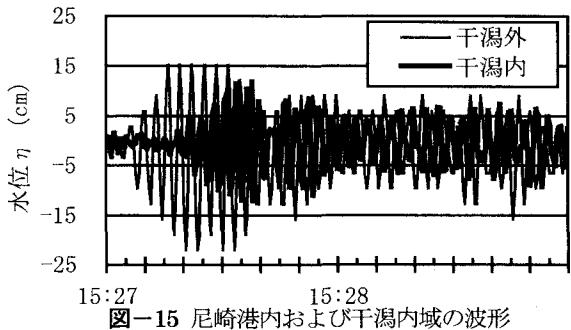


表-1 代表波の最大値

代表波	最大値を示した観測時刻	最大値	最大値を示したときのその他の代表波			
			$H_{\max}$	$T_{\max}$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$
$H_{\max}$	10月8日 1:00	44cm	—	5.8sec	15cm	2.6sec
$T_{\max}$	10月4日 12:30	17.9sec	15cm	—	10cm	2.7sec
$H_{1/3}$	10月5日 2:00	17cm	31cm	2.5sec	—	3.0sec
$T_{1/3}$	10月6日 4:00	4.0sec	15cm	1.3sec	11cm	—

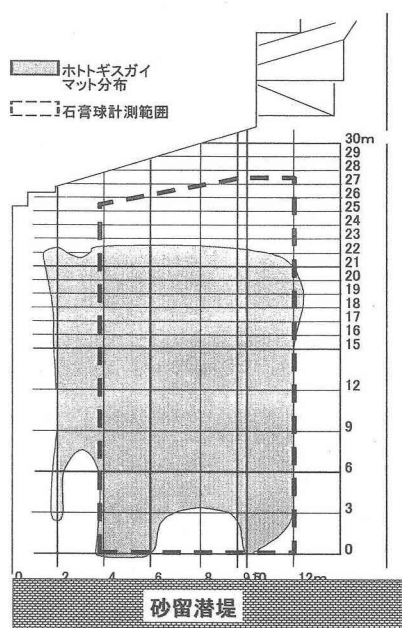


図-17 ホトトギスガイの生息分布



写真-1 ホトトギスガイのマット化

(7) 物理的攪乱が干潟生物および影響

前節(4)にて、ホトトギスガイが優占種として出現することで、当初の干潟造成の目的であるアサリの生息環境を阻害している可能性を示した。ここでは、ホトトギスガイの生息環境要因として、干潟に作用する流速との関係に着目し、干潟域の流速分布とホトトギスガイの生息分布を比較した。

平成15年10月の干潟生物の集中調査において、ホトトギスガイの生息状況を目視にて確認した結果を図-17に示す。図に示すように、ホトトギスガイは砂留潜堤から3m～21m領域で広範囲に生息していることが目視で確認できた。特に、潜堤から9m～18mの地形変形が少ない領域では、写真-1に示すようにマット状に生息していることが確認されている。前掲の図-16に示した干潟域に作用する流速分布とホトトギスガイの生息分布を比較すると、流速の大きな潜堤背後域および、潜堤から24m～27m離れた領域でホトトギスガイが出現していない結果が得られている。この結果は、流速場が大きければホトトギスガイがマ

ット状に生息しないことを示唆するものである。このことから、当該水域では物理的攪乱が干潟生物相の形成に大きく寄与することが推定される。

4. 結論

過栄養化で閉鎖性の強い尼崎港に造成した干潟では、波浪等の物理的攪乱が小さいことから地形形状の変化が小さく、付着藻類や底生生物が定着しやすい。特に、過剰な懸濁物により懸濁物捕食者(二枚貝)が増えやすい傾向が確認された。このような生物の定着は水質浄化機能や生物多様性の向上に寄与するものの、過剰に出現することで有機物を干潟に蓄積することが示唆される。また、特定の二枚貝が過剰に出現することでマット状に生息域を形成し、他の生物種の定着を阻害することも危惧される。このような現象は、適度な物理的攪乱により解消する結果を現地実験・調査結果より得ており、今後、過栄養化で静穏度の高い場における干潟の計画・設計・施工には物理場(流れ・波浪等)による攪乱を考慮することが重要であることを結論として導いた。

謝辞：本研究は環境省が実施する環境技術開発等推進費助成(平成13年度～15年度)を受けて(財)国際エメックスセンターが推進している研究プロジェクト『閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化』の一環として実施したものであり、謝意を表す。

参考文献

- 1) (財)国際エメックスセンター：閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化—研究開発進捗状況等報告書—(平成14年3月), 2002.
- 2) (財)国際エメックスセンター：閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化—研究開発進捗状況等報告書—(平成15年3月), 2003.
- 3) T.Komatsu and H.Kawai : Measurements of time-averaged intensity of water motion with plaster balls, Journal of Oceanography, Vol.48, pp.353-365, 1992
- 4) 川俣茂：生物の生息環境としての流動とその調査方法, 月間海洋, Vol.24, No.8, 1992
- 5) 上月康則, 村上仁士, 戸高英二, 米田耕造, 小西哲也：海岸構造物建設に伴う平均流速の変化と底生生物の応答について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.54th, pp.244-245, 1999
- 6) 石垣衛, 大塚耕司, 桑江朝比呂, 中村由行, 上月康則, 上嶋英機：大阪湾奥の閉鎖性水域に造成した捨石堤で囲干潟の効果と課題, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1236-1240, 2003