

# 尼崎運河に設置した小水路における藻類を用いた 水質改善手法の現地実験

Field experiment on restoration technique for water quality using primary productivity  
of algae in Amagasaki Canal

山中亮一<sup>1</sup>・上月康則<sup>2</sup>・一色圭佑<sup>3</sup>・森紗綾香<sup>4</sup>・川井浩史<sup>5</sup>  
石垣 衛<sup>6</sup>・上嶋英機<sup>7</sup>・高橋秀文<sup>8</sup>

Ryoichi YAMANAKA, Yasunori KOZUKI, Keisuke ISSHIKI, Sayaka MORI  
Hiroshi KAWAI, Mamoru ISHIGAKI, Hideki UESHIMA and Hidehumi TAKAHASHI

The Amagasaki Canal where is an enclosed waters have been polluted and occurred eutrophication and hypoxic condition chronically. According to restore water environment in the canal, design of new restoration plant and substantiative experiment are preceded by the Amagasaki Sea Blue Project. In this study, long-term field experiment of water quality improvement technique using algae was examined. Water of sea bottom drawn from the canal and flow into the experimental small channel. This study focused on reduction of nutrients concentration and aeration with the photosynthesis by alga which was luxuriated naturally. As a result, it is found that the technique was very effective in daytime and summer in particular and disposal of exuberant algae will be required for isolation from material circulation in the canal.

## 1. 緒論

大阪湾の北東最奥に位置する尼崎運河は、水門と閘門により水位管理された閉鎖的な汽水域である。高い閉鎖性の水域であるにもかかわらず、周辺からの事業所排水による流入負荷を長年にわたり受けているため、年間を通して富栄養化、貧酸素化、有機汚泥の堆積が顕在化しており、その程度から我が国における代表的な汚濁水域のひとつと言える(中西ら, 2007)。この尼崎運河では現在、2007年に策定された「21世紀の尼崎運河再生プロジェクト」などにに基づき運河を核とした魅力ある地域づくりが進められているものの、水質汚濁が課題のひとつとなっている。そのため、2005年より「尼崎シーブルー事業」が開始され、生物の物質循環機能を利用する水質浄化技術を組み合わせて適用する手法が検討されている。この手法は生態系工学に基づいており、環境への負荷が小さく、効果の持続性を有するという特長がある。



図-1 尼崎運河位置図および実験施設設置場所

2007年10月には現地実証実験が開始され、現地適用が検討されている技術の機能評価と維持管理方法について研究が進められた。これまでに得られた成果の一部は山中ら(2008)、森ら(2009)により報告されている。

本研究で対象とする水質改善手法は、藻類の繁茂に適した小水路に揚水した海水を連続的に流下させ、そこに自然繁茂する藻類の一次生産機能を利用し、水中に溶存している栄養塩を藻類として固定することで水中から除去し、さらに貧酸素水への曝気効果による酸素供給を期待するものである。実験は2007年10月から2010年1月までの期間に現地に設置した専用の実験施設において実施した。本研究では、この手法による水質改善効果と環境条件による機能変化を明らかにすることを目的とする。

このような水路における生物の一次生産機能を利用し

1 正会員	博(工)	徳島大学大学院講師ソシオテクノサイエンス研究部
2 正会員	博(工)	徳島大学大学院教授ソシオテクノサイエンス研究部
3 学生会員	学(工)	徳島大学大学院先端技術科学教育部環境創生工学専攻
4 学生会員	修(工)	徳島大学大学院先端技術科学教育部環境創生工学専攻
5 正会員	理博	神戸大学教授内海域環境教育研究センター
6 正会員	博(工)	広島工業大学准教授工学部都市デザイン工学科
7 正会員	工博	広島工業大学大学院教授環境学研究所
8 正会員		兵庫県出納局工事検査室室長

た水質浄化技術として、たとえば、生活雑排水を対象とした大久保ら(1993)や、水生植物のヨシやホテイアオイを用いて浄化する方法(田畑ら, 1996), 付着生物膜による自浄作用を用いた隙間接触浄化法(小田ら, 1992, 毛利ら, 1993), 接触酸化法を用いた橋本ら(1987)など、これまでに数多く研究されているが、汽水性の運河などを対象とした研究事例はほとんど見られない。

## 2. 実験施設および調査概要

### (1) 実験施設

実験施設の小水路は、図-1に示す地点に位置する運河に隣接する駐車スペースに2007年10月に設置した。施設の概観を写真-1, 形状を図-2に示す。この小水路はコンクリート製であり、総延長は113.8m, 各水路の幅は0.3mである。底部形状は折り返し部より流下方向に深くなるように傾斜しており、水深は0.08~0.12mの間である。運用時の水容積は3.91m<sup>3</sup>である。海水は運河の底層(海底上0.5m)よりポンプにより汲み上げ、流量25L/min(滞留時間2.7hr)で掛流し式に小水路に流下させた。

### (2) 調査方法

#### a) 水質調査

汲み上げた海水の流下にとともなう水質変化と水質改善機能の定量化を目的に水質と藻類の計測を行った。調査項目, 調査実施日は表-1のとおりである。調査地点は図-2に示すとおり約30m間隔(St.1~5)に設け, 多項目水質計(Hydrolab社製: DataSonde-5)を用いて, 水温, 塩分, 溶存酸素濃度(以下DOと表記)の計測を行った。また, 同地点で採水を行い, ろ過した試料をTNTPオートアナライザー(BLTEC(株)製: AACs-V)により硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N), 亜硝酸態窒素(NO<sub>2</sub>-N), アンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N), リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)の濃度分析を行った。

#### b) 栄養塩固定・溶出速度および酸素消費速度調査

2009年8月17日および2010年1月19日に, St.1とSt.2の中間地点で藻類による栄養塩の固定・溶出速度および酸素消費速度をチャンバー法により明暗条件下で測定した。実験系の概要を図-3に示す。容器上部には溶存酸素計(東亜DKK(株)製: DO-21P)を設置し容器内の海水のDOを計測した。使用した容器は直径13cm, 容量3Lのプラスチック製円柱であり, ウレタン製のコードラート(5cm×5cm)を容器底面に結合させた。内部には大気からの酸素の溶け込みを防ぐため落し蓋を設置した。DOが安定した後, 30分間隔で明暗条件にて約3時間測定を行った。また比較用として底面が密閉されている(底生藻類を含まない)容器に海水を入れ, 同様に計測対象とした。

実験終了後, チャンバー内の海水をシリンジにより採水し, 溶存態無機窒素(DIN)およびPO<sub>4</sub>-Pの濃度分析



写真-1 実験施設 (小水路下流より撮影)

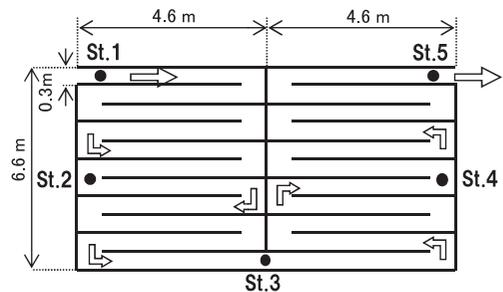


図-2 小水路の形状と調査地点 (矢印は流向)

表-1 調査内容

	項目	調査実施日
水質	水温, 塩分, DO	2007年11月より毎月1回 ※2009年8月17日, 2010年1月19日は昼間と夜間で実施
	NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P	
藻類	Chl.a, Pheo.	2009年10月, 11月

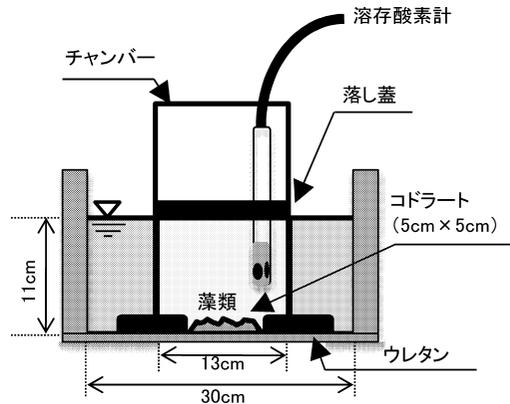


図-3 チャンバー実験系の概要

を行った。なお, DINはNO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-Nの合計値である。その後, チャンバー底面のコードラート内の藻類を剥ぎ取り, アセトン抽出法によりクロロフィルa(Chl.a), フェオフィチン(Pheo.)を測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 海水からの栄養塩除去機能の定量化

2007年11月の実験開始後、すぐに自然加入した藻類が繁茂を始め、2008年春季から夏季にかけてはスジアオリなどの緑藻アオサ属の海藻が水路表層をすべて覆う程に繁茂した。また翌年2009年夏季から冬季にかけては、前年と異なり主に底部で藍藻（シアノバクテリア）や珪藻などの微細藻類が繁茂し、水路上流部の壁面に少量のアオサ属の種や、シオグサ属の種を確認した。

図-4に緑藻アオサ属が繁茂した時（2008年夏季）の小水路内の溶存態栄養塩（DIN, PO<sub>4</sub>-P）の濃度分布を示す。この時の水路内は平均水温24.1℃、平均塩分20psu、水面上の日射量761.6μmol/m<sup>2</sup>/sであった。DINはSt.3（流下距離60m地点）で流入水より75%の低下がみられた。St.1とSt.5における濃度差から算定した栄養塩除去量は、NO<sub>3</sub>-Nは1.20mg/min、NO<sub>2</sub>-Nは1.56mg/min、NH<sub>4</sub>-Nは6.12mg/min、PO<sub>4</sub>-Pは5.04mg/minであり、流入水質に対する除去率は、DINは96%、PO<sub>4</sub>-Pは97%であった。これは下水処理施設に例えると、高度処理施設（窒素除去率70%、リン除去率95%）（國松, 1992）と同程度の性能であった。また、栄養塩濃度の低下量は水路上流のほうが大きく、これは藻類の繁茂状況は均一ではなく、とくに緑藻が上流に多く繁茂していたためと考えた。以上の結果より、夏季昼間の晴天時において流下距離が120m程度あれば、溶存態栄養塩を96%以上除去しうる事がわかった。

次に夜間について検討した。図-5、図-6に2009年8月17日の昼間と夜間に計測したDINとPO<sub>4</sub>-Pの流下にもなう濃度変化を示す。このときは、前年と藻類が繁茂する状況が異なり、前述のとおり、主に藍藻・珪藻が繁茂していた。DINとPO<sub>4</sub>-Pにおいて、昼間は両者ともに流下にもなう濃度が低下した。一方、夜間は昼間のような栄養塩濃度の大きな低下は生じておらず、とくにPO<sub>4</sub>-Pでは、むしろ流下にもなう濃度が上昇した。詳細は第(3)節にて後述するが夜間における小水路内のDOは貧酸素化しており、枯死した藻類からの栄養塩の溶出が生じている可能性があると考えた。

そこでチャンパー法を用い明暗条件下で栄養塩の固定速度と溶出速度を測定した。計測はSt.1とSt.2の中間地点で、2009年8月17日と2010年1月19日に行った。結果を図-7に示す。図-7(a)よりDINは、暗条件の結果より夏季には0.51mg/0.0025m<sup>2</sup>/day、冬季には0.43mg/0.0025m<sup>2</sup>/dayの溶出が生じていた。しかし、夏季は溶出量よりも除去量の方が卓越しており一日における収支では、0.30mg/0.0025m<sup>2</sup>/dayの除去となっていた。一方、冬季では藻類によるDINの除去量が夏季に比べて小さく、一日における収支では溶出量が多いことがわかった。

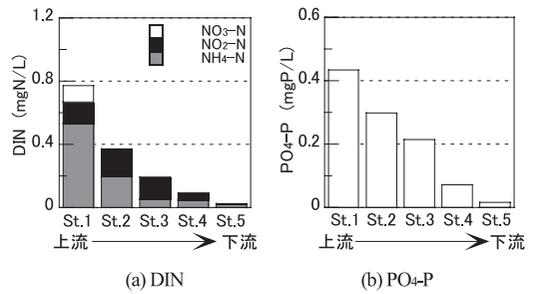


図-4 緑藻アオサ属繁茂時の昼間における栄養塩分布 (2008年6月26日)

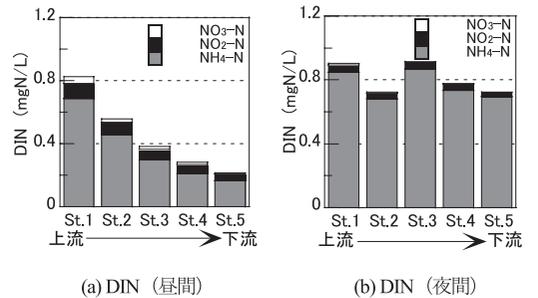


図-5 夏季の昼間と夜間における溶存態無機窒素の分布 (2009年8月17日)

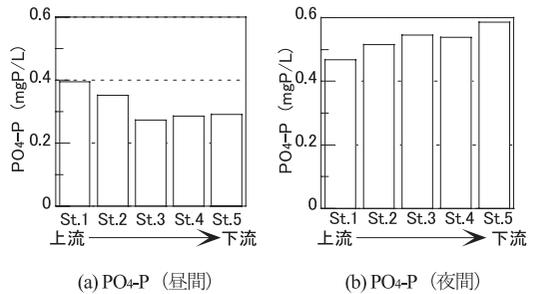


図-6 夏季の昼間と夜間におけるリン酸態リンの分布 (2009年8月17日)

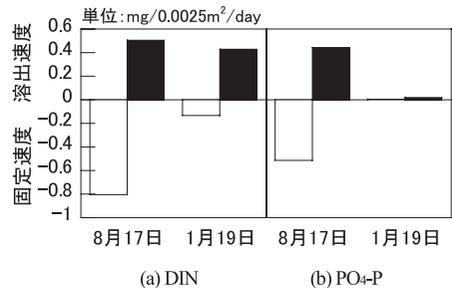


図-7 栄養塩固定速度と溶出速度の季節変化

図-7(b)に示すPO<sub>4</sub>-Pも同様の傾向であったが、とくに冬季は流入水中のPO<sub>4</sub>-P濃度が低下するため、除去量はわずかであった。

## (2) 環境条件による機能変化と栄養塩の年間収支

水中からの栄養塩除去機能の変化を詳細にみるため、単位距離あたりのDINとPO<sub>4</sub>-P除去量の経月変化を図-8に示す。ここで示す結果は昼間の計測値であることに注意されたい。図-8によると、除去量は3月から8月にかけて増加し、9月から11月にかけて減少する傾向が認められた。また、2008年と2009年の夏季における除去量に差異が認められるが、これは前述の緑藻の繁茂状況の差異(2008年のみ繁茂したこと)と対応しており、両年の水質・気象条件に大きな差異がなかったことから、実験条件規模の水路の場合、藻類の種や量が変わることにより緑藻の繁茂が無い場合とある場合を比較すると、DIN除去量が最大で約20mg/m変化することがわかった。緑藻活性の季節変化は既往の研究でも指摘されており、たとえば、スジアオノリなどの糸状緑藻は水温の上昇する春季から秋季にかけて活性が高く水温の低下する冬季は活性を失うとの指摘がある(久納ら, 1997)。そこで、秋季における付着藻類量の変化、藻類のChl.a量とPheo.量の合計に対するChl.a量の割合、水温をそれぞれ図-9、図-10、図-11に示す。図-9をみると、2009年10月から11月にかけて付着藻類量が大きく減少しており、このとき図-10に示す藻類に含まれるChl.a量の割合が減少していた。これより秋季には藻類の枯死が進み、それにともない栄養塩は再び溶存態に分解、もしくは藻類のまま剥離し、返送水とともに運河に戻されたと考えられる。これより、正味の栄養塩除去を行なうためには、藻類が枯死するまえに、藻類の系外除去を行なう必要があると考えられる。図-11に示す水温は2008年と2009年とほぼ同様の変動をしており、両年の差は認められなかった。図-8と図-11を比較すると、水温が低下する9月以降の昼間における水中からの栄養塩除去量は低下しており、これより久納ら(1997)の指摘にある水温低下にもなう糸状緑藻類の活性低下も栄養塩除去量の低下の原因のひとつと考えられる。これらより藻類の系外除去は、枯死と活性の低下が生じる水温の低下が始まる時期を目安に実施するのが良いと考えた。

次に、本実験における溶存態窒素の付着藻類による除去量を検討した。まず、2008年11月から2009年10月までの一年間における栄養塩流入量を算定した。さらに、2009年10月に、水質変化が大きかった本水路のSt.1とSt.3の間(流下距離60m)に堆積した付着藻類量と窒素含有量を測定した。その結果、付着藻類量は111wetkg/yearであり、これに窒素含有量を乗じた結果、1444gN/yearと換算された。これは一年間に流入する溶存態窒素量の16%に相当した。ただし、本結果は付着藻類量が減少する時期にあたる10月の結果であり、栄養塩除去量が大きい時期(たとえば、8月や9月)では、さらに

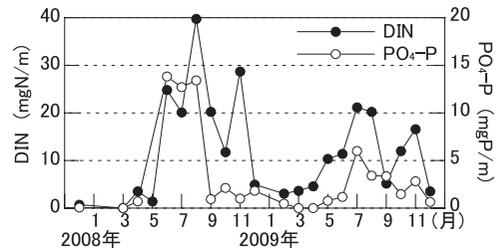


図-8 昼間の栄養塩除去量の月変化

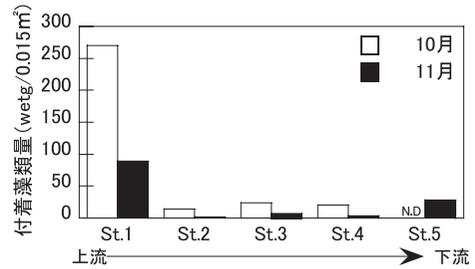


図-9 水路内に繁茂した付着藻類量分布の月変化

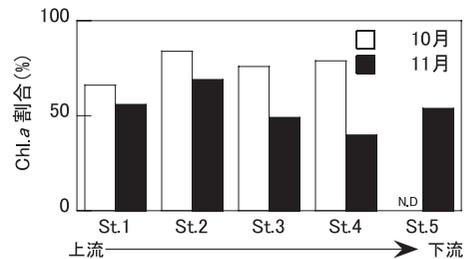


図-10 藻類のChl.a量 + Pheo.量に対するChl.a量の割合

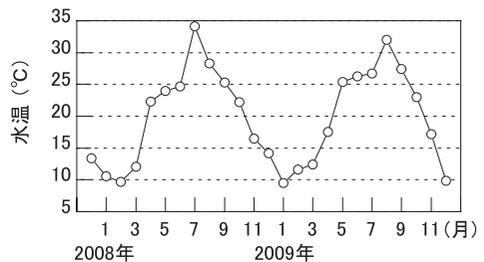
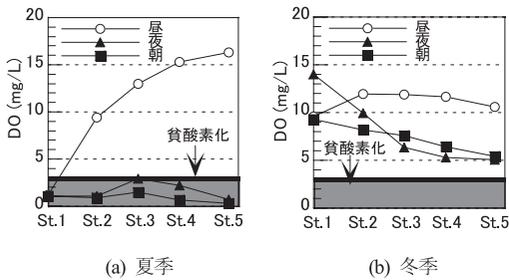


図-11 水路内における水温の経月変化

この割合は増加するものと推測される。

## (3) 曝気効果

水路内のDOは、図-12(a)に示すように、夏季の昼間は藻類の基礎生産活動により流下にもなない増加した。流入時に貧酸素状態であった海水は30m流下することで約8mg/Lまで上昇し、高い曝気効果が認められた。ところが夏季の夜間は貧酸素化した流入水と水路内の酸素消費により、水路全域で貧酸素化した状態が続いた。一方、図-12(b)に示す冬季は流入水のDOが8mg/Lと高く、昼間は3mg/L程度の上昇、夜間は藻類の呼吸および堆積物



(a) 夏季 (b) 冬季  
図-12 水路内の溶存酸素の分布

の分解のためDOは約5mg/L減少することがわかった。

本実験から夏季の昼間においては十分な曝気能力を示すものの、夏季の夜間においては貧酸素化が著しく、藻類として固定した栄養塩が溶出しやすい環境となっていた。なお、この夜間の貧酸素化による昼間の栄養塩除去機能への影響については、さらなる検討が必要である。

#### 4. 結論

本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

- 1) 本実験施設において、スジアオノリなどの緑藻アオサ属の海藻が繁茂した場合、夏季の昼間において、高度処理施設と同程度の水中の栄養塩除去機能を有することがわかった。
- 2) 栄養塩除去機能は一定ではなく、季節、構成する藻類種により変動した。藻類は冬季に枯死し水路内に堆積するため、水路内に繁茂した藻類は枯死する前に系外除去する必要がある。その時期として、栄養塩除去機能が低下する9月以降の降温期が望ましい。
- 3) 2009年10月時点での水路内の付着藻類に含まれる窒素含有量は流下距離60mあたり1444gN/yearであり、これは一年間に流入する溶存態窒素量の16%に相当した。
- 4) 夏季の昼間は藻類の生産により30m流下するのみで貧酸素化が改善された。しかし、夜間は流入水のDOから変化なく、水路全域で貧酸素化する傾向がみられた。本技術は、高度処理に匹敵する除去量を如何に維持するかという運用上の課題があるものの、高機能、低エネルギー利用、低コストであり、尼崎運河への適用性が高い技術であると言える。また、繁茂した藻類には、ヨコエビやゴカイ類などの生物が多く棲息するため、海の生

態系を安全に学ぶための良い場所となっており、筆者らは、本実験施設を市民が生物機能を利用した海域の環境再生技術を学び、考え、ふれ合える場としてすでに活用している。

謝辞：本研究は「尼崎シーブルー事業計画技術検討会（兵庫県）」の一環として行われたものであり、関係者の皆様からは多大なご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

大久保卓也, 岡田光正, 村上昭彦 (1993) : 小水路における生活雑排水の浄化特性, 水環境学会誌, 第16巻, 第4号, pp.261-269.

小田一紀, 貫上佳則, 重松孝昌, 大屋博史, 綱潔之, 倉田克彦 (1992) : 隙間生物膜の海水浄化効果と現地へのその応用に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.991-995.

國松孝男 (1992) : 近畿の水瓶・琵琶湖, 近畿化学工業会, p.476.

久納 誠, 丹羽 薫 (1997) : 糸状藻類の溶解性オルトリン酸態リンの吸収能における濃度および水温依存性, 水環境学会誌, 第20巻, 第4号, pp.269-277.

久納 誠, 丹羽 薫, 中本信忠, 福渡 隆 (1997) : 糸状藻類のリンおよび窒素吸収能の日周期性に関する実験的研究, 水環境学会誌, 第20巻, 第5号, pp.338-346.

田畑真佐子, 加藤聡子, 川村 晶, 鈴木潤三, 鈴木静夫 (1996) : ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果, 水環境学会誌, 第19巻, 第4号, pp.331-338.

中西 敬, 上月康則, 森紗綾香, 川井浩史, 辻 博和, 上嶋英機 (2007) : 尼崎港内運河における環境修復の取り組み～開門・水門を利用した流況制御・水質改善実験, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.757-762.

橋本 茂, 井上 充, 田中克彦, 竹下三吉 (1987) : 水路を利用した接触酸化法による都市下水の浄化の検討, 神奈川県公害センター研究報告, No.9, pp.159-168.

毛利光男, 須田有輔, 上原 功, 門倉伸行, 田中裕作, 細川康史 (1993) : 汚濁海水における隙間接触水路内の抑留物の分布と閉塞について, 水環境学会誌, 第16巻5号, pp.516-525.

森紗綾香, 山中亮一, 上月康則, 板東伸益, 高橋秀文, 上嶋英機 (2009) : 尼崎運河における護岸付帯式浅場を用いた砂浜性二枚貝の生息空間に関する現地実験, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.431-436.

山中亮一, 上月康則, 森 友佑, 森紗綾香, 板東伸益, 高谷和彦, 上嶋英機 (2008) : 尼崎運河での水環境改善に向けた新しい曝気手法に関する現地実験, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1246-1250.