

尼崎運河水質浄化施設から得られる  
生態系サービスに関する研究

2017 年 3 月

一 色 圭 佑

## 目 次

第 1 章	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.2	尼崎運河における水質改善の取り組み	6
1.3	研究目的	8
1.4	本論文の構成	9
	参考文献	9
第 2 章	尼崎運河の水環境特性	12
2.1	緒言	12
2.2	現地調査および実験方法	13
2.2.1	水質	13
2.2.2	生物	15
2.2.3	底質	16
2.3	結果および考察	18
2.3.1	水質の季節変動特性	18
2.3.2	出現生物の特徴	31
2.3.3	懸濁粒子の沈降による酸素消費量	36
2.3.4	底質による酸素消費量および栄養塩溶出量	38
2.4	結言	41
	参考文献	43
第 3 章	尼崎運河水質浄化施設の機能評価	46
3.1	緒言	46
3.2	水質浄化機能	47
3.2.1	施設概要と現地調査方法	47
(1)	懸濁物除去水槽および曝気水槽	48
(2)	栄養塩回収水路	50
(3)	人工干潟	52
(4)	水質浄化活動	56
3.2.2	結果	56
(1)	懸濁物除去水槽および曝気水槽	56
(2)	栄養塩回収水路	58

(3)	人工干潟	59
(4)	水質浄化活動	60
3.2.3	考察	61
(1)	水質浄化施設全体での水質浄化効果	61
(2)	市民協働活動による栄養塩除去量の向上	64
(3)	尼崎運河の水環境特性との関係	67
3.3	社会創生機能	67
3.3.1	参与観察の概要	67
(1)	人工干潟の順応的管理	67
3.3.2	結果	68
(1)	人工干潟の順応的管理	68
(2)	生態系サービスによる機能の分類	69
3.3.3	考察	76
(1)	生態系サービスの評価	76
(2)	社会的ニーズと協働創生の要因	79
(3)	企業活動との協働による共創関係に関する一考察	82
3.4	結言	87
	参考文献	89
第4章	結論	93
	謝辞	95

# 第 1 章 緒 論

## 1.1 研究背景

わが国は高度経済成長期以降、産業・経済は飛躍的な発展を遂げた。沿岸部においては、浅海域の埋立てによる土地造成や防波堤などの海岸保全構造物が建設され、我々は安全・安心な生活を送ることが可能となった。しかし、その代償として、白砂青松の美しい海辺風景や藻場・干潟などの浅場は減少し、市民が海と触れ合うことのできる親水空間は激減し、豊かな生態系を育む場が数多く消失した。直立護岸で囲まれた沿岸域では、生物の生息場が減少し生物多様性が損なわれることにより、自然が本来持つ浄化機能が弱まり、健全な物質循環ができず水質汚濁や底質悪化が進行するようになった。特に、高度経済成長期における瀬戸内海の水環境は、汚濁物質や栄養塩類(窒素・リン)の流入負荷が高く、かつ閉鎖的な海域であることから、赤潮による漁業被害が発生するなど劣悪な環境であった(今井, 2001)。このような水環境を改善するための対策として、「水質汚濁防止法」「湖沼水質保全特別措置法」などが制定され、さらに富栄養化をもたらす主要な栄養塩類の「環境基準設定」や「総量規制」もおこなわれてきた。このような制度に基づく対策の推進により、主として産業公害に起因する水質汚濁の防止・改善については大きな成果が得られた。全国的に一定の水質改善が図られたが、閉鎖的な内湾域では、富栄養化にともなう赤潮の発生、底層の貧酸素水塊の滞留に代表される青潮の発生、悪臭など劣化した水環境の顕著な改善には至っていない(図 1.1)。特に、大都市を背後に抱える東京湾や大阪湾の沿岸域では人間の生産活動を通じて陸域からの過剰な有機物や栄養塩類の流入により、慢性的な透明度の低下や底層の貧酸素化など水質が著しく悪化している(海洋政策研究財団, 2006)。

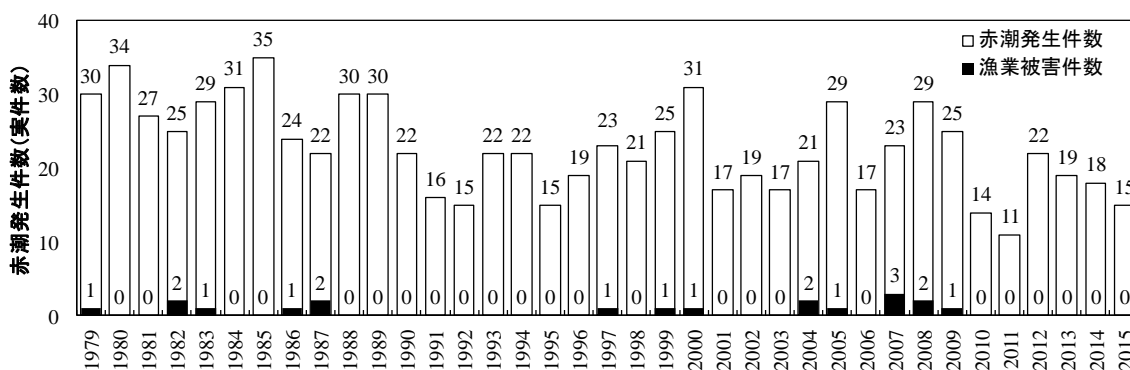


図 1.1 大阪湾における赤潮発生件数の推移  
(水産庁 瀬戸内海漁業調整事務所 瀬戸内海の赤潮，2015)

日本の沿岸域における取組みの変遷を表 1.1 に示す。前述したように高度経済成長の時代は安全・安心な生活を目標とした防波堤の整備や埋め立てによる開発が進み，それに伴う水質の悪化を招いてきた。そのような時代を経て，1980 年代には水質改善を目標としたシーブルー事業が進められ，様々な水質改善のための政策や技術が実験・評価されてきた。その後，1990 年代から 2000 年代にかけて，生態系との共生が議論されるようになり，従来の単一の水質改善技術から場の機能変化を評価・予測していくことがおこなわれた。近年では，人間が自然から享受する恩恵である「生態系サービス」を将来まで享受し続けることができる「持続可能な社会」の構築を目指す政策が進められている。沿岸域における取組みとして，「里海」の考えが(柳，2005，2006)ある。

表 1.1 日本の沿岸域における取組みの変遷  
(生態系工学会, 2009)

年代	取組み	目標
戦後 ～1970 年代	防災機能の整備と経済成長による環境悪化 ⇒防波堤, 埋め立て	安全・安心な生活
1980 年代	シーブルー事業による水質改善 ⇒環境修復を目指した個別政策・技術の評価	水質改善
1990 年代	環境と共生する港湾～エコポート政策～ ⇒場の機能変化の評価と予測	生態系との共生
2000 年代	環境保全と自然再生 ⇒生態系保全の強化, 自然再生の推進	持続可能な社会の構築

近年では, 持続可能な社会の実現や自然と共生する社会の形成を考えた「都市の再生」への取り組みが求められている. 研究対象地である尼崎運河のように大都市近郊にある水辺空間を都市の魅力の一部として見直され始めた場所のひとつである. 尼崎運河周辺では, 人々が親水空間として利用するために悪化した水環境を改善するニーズが高まり, 尼崎 21 世紀の森構想の策定(2002 年), 大阪湾再生推進会議の設置(2003 年), 大阪湾再生行動計画(第一期)の策定(2004 年), 尼崎シーブルー事業計画の策定(2005 年)など, 自然環境の保全・再生への取り組みがおこなわれている. さらに, 2007 年には国土交通省の運河を核とした魅力ある地域づくりへの取り組みを支援する「運河の魅力再発見プロジェクト」に「21 世紀の尼崎運河再生プロジェクト」として認定された. これにより, 市民と行政が一体となり, 運河の環境改善に取り組む動きが促進された. その後, 2014 年には, 大阪湾再生行動計画(第二期)の策定がおこなわれ, 大阪湾の環境改善に向けて多様な主体の連携と参画により, 森・川・都市・海などの空間・人的ネットワークを多面的に強化・広げることで, 効率的かつ効果的な取り組みを推進することが理念として掲げられた(大阪湾再生推進会議, 2014). この行動

計画の目標は「森・川・里・都市・海等のネットワークを通じて、美しく豊かな「魚庭（なにわ）の海」を回復し、市民が誇りうる「大阪湾」を創出する」ことである。この計画の中で、尼崎運河周辺は「水に親しみ学べる尼崎の海辺」としたアピールポイントに選定されており、大阪湾についての理解を深めることができる場所として設定されている(表 1.2, 図 1.2)。また、この行動計画は表 1.3 に示す評価指標により、各区分(水質, 生物, 浮遊・漂着・河川ごみ等, 親水空間, 市民や企業の取り組み, イベント)の目標達成状況の評価がおこなわれており、評価手法は評価結果を踏まえ適宜見直されるなど順応的に進捗管理がおこなわれている。

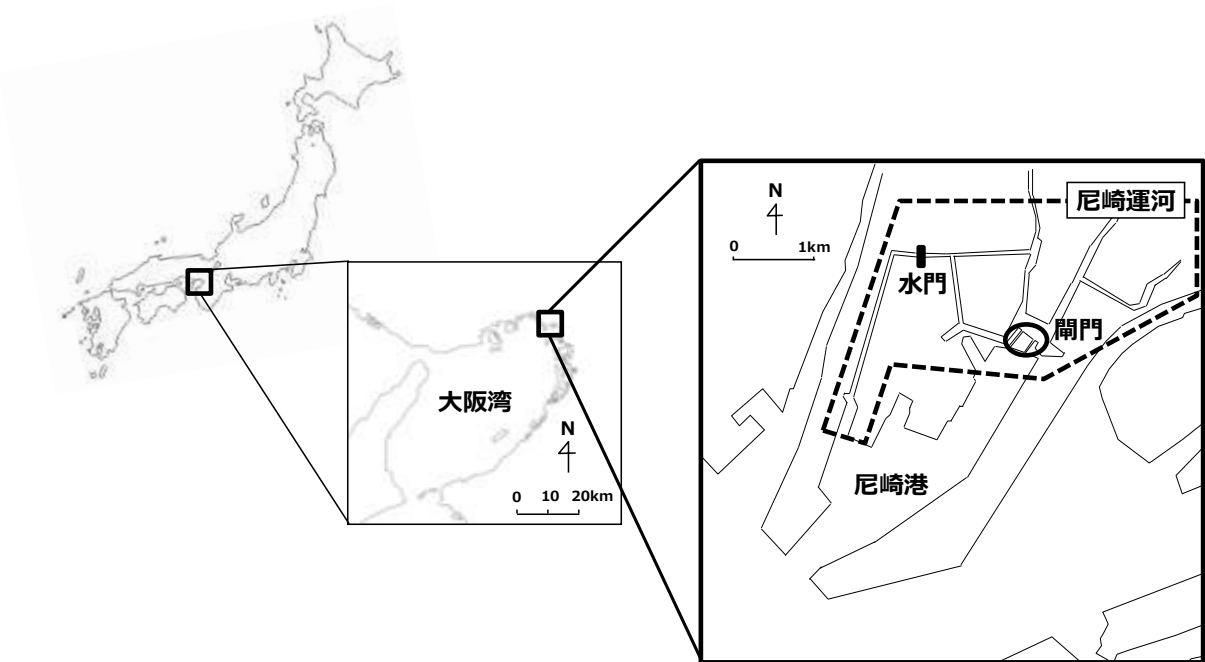


図 1.2 尼崎運河の位置

表 1.2 アピールポイントの一覧  
(大阪湾再生推進会議，2014)

No.	アピールポイント	アピールポイントに含まれるエリア
①	潮風かおる港町神戸	須磨海岸，兵庫運河，ハーバーランド～HAT神戸，ポートアイランド，神戸空港
②	水に親しみ学べる尼崎の海辺	尼崎運河周辺
③	まちなかで水に親しめる水都大阪の水辺・海辺	中之島，舞洲～夢洲，新島，咲洲
④	豊かな自然と歴史を感じられる琵琶湖	琵琶湖
⑤	市民が参加した川づくりが進む大和川	大和川，佐保川
⑥	海に親しめる多様な場がある堺の海辺	堺浜，堺旧港
⑦	海の恵みを楽しめる堺・高石の漁港	堺(出島)漁港，高石漁港
⑧	海水浴やマリンレジャーが楽しめる阪南・泉南の海岸	二色の浜，せんなん里海公園
⑨	海の恵みを楽しめる泉南の漁港	泉佐野漁港，田尻漁港，岡田浦漁港，深日漁港，小島漁港

表 1.3 大阪湾再生行動計画(第二期)における評価指標一覧  
(大阪湾再生推進会議，2014)

区分	評価指標
水質	表層COD
	底層DO
	透明度
	TN(および形態別窒素)
	TP(および形態別リン)
	赤潮発生頻度
生物	底生生物(種類数・個体数)
	海岸生物(確認された種，数)
	整備面積
浮遊ごみ，漂着ごみ，河川ごみ等	ごみ回収量
	ごみ回収活動参加者数
	利用者アンケート結果
親水施設	整備面積，整備延長
	訪問者数
	利用者アンケート結果
市民や企業の取り組み	実施活動数
	参加者数
イベント	参加者数
	利用者アンケート結果



## 1.2 尼崎運河における水質改善の取り組み

尼崎運河を親水空間として利活用するためには悪化した水質を改善する必要がある．有機物や栄養塩の負荷に起因する水質悪化を根本的に防ぐには，運河に流入する負荷量を抑えることが急務である(柳，2004)が，周辺に隣接する各工場からの事業所排水は，厳しい環境基準が課せられており，さらに基準を厳しくすることは困難である．各事業所は排水基準を遵守しても運河内海域に負荷される量はそれらの総量であり，運河への負荷量は膨大になっているのが現状である．このような現状を踏まえ，これまでに本運河において様々な水質改善技術が適用されてきた．例えば，覆砂による底泥からの栄養塩溶出削減(兵庫県，1992)がおこなわれたが，有機懸濁物の再堆積の速度が速く，効果の持続性に問題があった．また，中西ら(2007)は水門の開閉操作を工夫し，運河内に一方向の流れを発生させ，海水交換を高めることで底層の溶存酸素を改善する実験を行った．この方法により，一時的に水門付近の底層の溶存酸素が回復する結果が得られたものの，底泥の巻上げによる透明度の低下など二次的な問題が発生したと報告している．このように，物理的な方法による対策が試みられたが，経済性，効果の持続性に欠けるなど思わしい成果が上がっていないのが現状である．

近年では，生態系の機能を強化・修復・保全し，有効に利用する生態工学的な手法に基づいた環境保全修復技術が注目されており，人と自然の共存を目標に持続可能かつ環境に良好な技術の開発が進んでいる(須藤，1990，須藤，2000)．この手法は環境への負荷が小さく，効果の持続性を有し，維持管理が容易，さらに費用が安価であるなどの特長がある．本運河においても，2007年10月から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として，山中ら(2008)は，運河内底層において水塊構造を破壊しない程度のマイクロバブルによるエアレーションによる酸素供給をおこない，護岸に付着する二枚貝類や甲殻類など生物の生息範囲を拡大させることが可能であると報告している．また，森ら(2009)は運河内において護岸付帯式の浅場を設置しアサリなどの砂浜性二枚貝の生息空間を創出する実験をおこない，表層では生育が可能であると報告している．さらに，山中ら(2010)は運河内の底層水を汲み上げ，水路を自然流下させ，水路内に繁茂した藻類の光合成により水中の栄養塩除去を試みており，夏期の好条件

下においては流入する栄養塩の 90%を除去できる実験結果を示している。

実証実験の結果を踏まえ、環境改善と運河利活用促進を目的とし、2012 年 3 月に「尼崎運河水質浄化施設」が設置され運用が開始された。本施設の特長は、省エネルギー、低コスト型であり、生物を用いた水質浄化技術が取り入れられている点である。浄化に寄与した生物は、人の手により陸域に取り上げ、水中から栄養塩を系外除去することで物質循環が促進される仕組みとなっている。図 1.3 に本施設の概要図を示す。このように、自然が持つ多様な機能を上手に利用することで、持続可能な社会と経済の発展に寄与する構造物を「グリーンインフラストラクチャー」(以下、グリーンインフラ)と呼ばれている。グリーンインフラは自然から様々な生態系サービスを享受できるものであり、同時に社会の様々な課題を解決するのに有効なものであると言われている(グリーンインフラ研究会, 2017)。

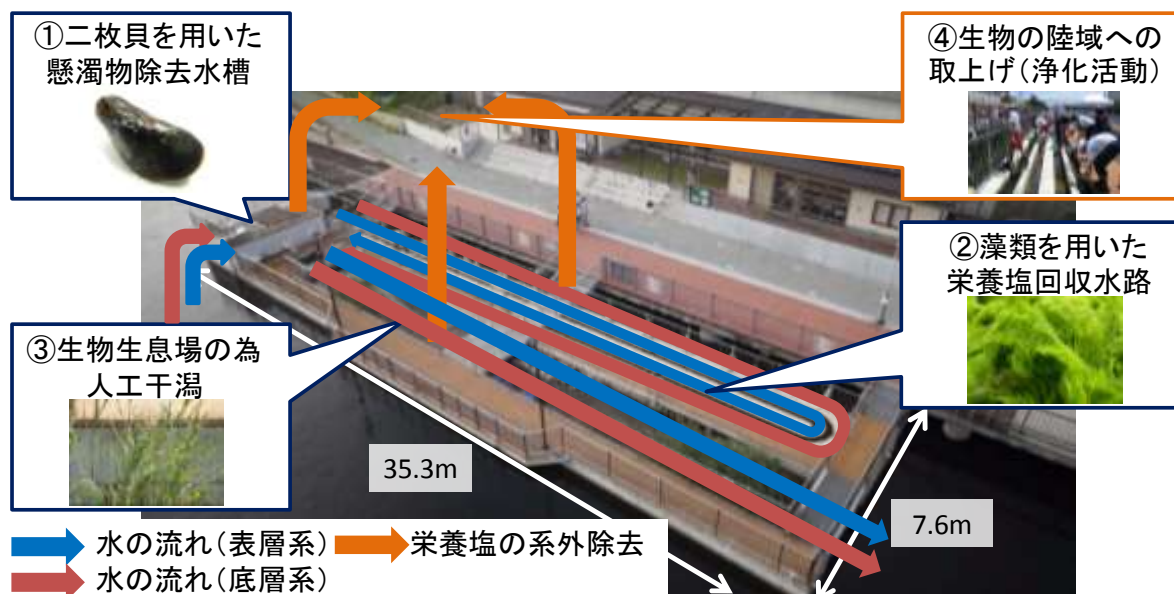


図 1.3 尼崎運河水質浄化施設 概要図

本施設では、生物の取上げによる物質循環の促進(水質浄化活動)が必須であったことから、運河の利活用向上も兼ねて市民協働体制でこの活動をおこなうことが当初より予定されていた。また、地元小学生へ

の環境教育も本施設竣工以前より尼崎運河で実施しており，引き続き環境教育をおこなうために，教育の場としての機能も付加している(森ら，2011)．こうした市民協働活動を円滑に進めて行くために，本施設竣工と同時に「尼崎運河まるまるクラブ」が組織された．本組織は，産・官・学・民といった各主体が緩やかに連結され，市民協働活動をおこなう上で必要とされる，主体間の公平性・平等性(岡田ら，2009)の維持を担っており，主に連絡調整や意見の集約，交換組織として機能している．その中で，徳島大学は専門家として本組織に参画し，また実際に市民協働活動へ参与しながら，技術的支援を行っている．さらに，市民協働活動をおこなう仕組みとして2013年より，毎月第3週の日曜日を市民協働活動日「オープンチャナルデイ」と定め，活動日毎に，各主体同士が今後の活動予定や活動計画についての話し合いや，企画された活動の実施がおこなわれている．

### 1.3 研究目的

水質汚濁対策から生態系の健全性を維持していくことが求められており，従来の水質管理を中心として視点から，生態系管理，物質循環の管理，多様な主体の連携・参画・協働により「豊かな海」を創出することが必要とされている(瀬戸内海研究会議，2007)．「豊かな海」を評価する考え方として，人間が自然から得られる恩恵「生態系サービス」としての評価が必要である．本研究では，グリーンインフラとしての尼崎運河水質浄化施設から得られる生態系サービスを中心とした，持続可能な社会の創生までを実現する方法と要因を明らかにする．本研究における概要を新規性，学術性，社会性の観点で以下に示す．

#### < 新規性 >

- ・ 市民協働により持続的に活用される沿岸域のグリーンインフラにおいて，生態系サービスの成り立ちを明らかにする．
- ・ 基盤サービスを構成する水環境の評価について，尼崎運河の水環境特性を長期データから明らかにする．

#### < 学術性 >

- ・ 物質循環の観点から，科学的な手法に基づき定量的に評価する．
- ・ 環境工学と社会学的な手法を組み合わせ評価する．

## < 社会性 >

- ・ 水質浄化の効果，市民協働の効果を定量的に把握し，市民にフィードバックすることで，新たな活動に発展させる起点となる順応的管理をおこなう．
- ・ 沿岸域でのグリーンインフラが持続的に活用されている場所における新しい生態系サービスの成り立ちを示し，今後のグリーンインフラ整備の際の一助となる．

## 1.4 本論文の構成

**第1章**では，研究の背景として，大阪湾における環境改善事業における変遷とこれから求められている技術について述べる．また，研究対象地である尼崎運河における水質環境改善の取り組みについての課題を整理し，本論文の目的を示す．

**第2章**では，尼崎運河内の水質特性と汚濁化の要因を外部負荷，内部負荷，内部生産の観点から明らかにする．また，本運河から得られる生態系サービスに関わる水質特性を抽出し，生態系サービスを享受するために必要な水質改善の目標や手法を明らかにする．

**第3章**では，第2章で示した運河内の汚濁機構を踏まえ，尼崎運河に設置した水質浄化施設から得られる生態系サービスを明らかにする．まず，水質浄化施設の水質浄化効果を定量的に示す．次に，水質浄化効果を向上させる市民協働活動の効果について考察をおこなう．さらに，グリーンインフラとしての尼崎運河水質浄化施設から得られる生態系サービスを中心とした，持続可能な社会の創生までを実現する方法と要因を明らかにする．

**第4章**では，本研究における成果を取りまとめて結論とし，今後の課題について言及した．

## < 参考文献 >

今井一郎(2001)：沿岸海洋の富栄養化と赤潮の拡大，海と環境－海変わると地球が変わる，日本海洋学会(編)，講談社，pp.203-211.

大阪湾再生推進会議(2014)：大阪湾再生行動計画(第二期)，30p

岡田久子，倉本宣(2009)：市民・行政・研究者の協働による絶滅危惧種

- カワラノギク保全活動の取り組みー多摩川における保全の実践とその評価ー, 保全生態学研究 (Japanese Journal of Conservation Ecology), Vol.14, pp.101-108.
- 海洋政策研究財団(2006):「海健康診断」, 166p.
- グリーンインフラ研究会, 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング, 日経コンストラクション(編)(2017): 決定版! グリーンインフラ, 日経 BP 社, 392p.
- 水産庁 瀬戸内海漁業調整事務所(2015): 昭和 54 年ー平成 27 年瀬戸内海の赤潮, 水産庁 瀬戸内海漁業調整事務所ホームページ <http://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/gepou/h27.html>, 2016/12/11 アクセス.
- 須藤隆一(1990): 水域の直接浄化の意義と展望, 用水と排水, 第 32 巻 8 号, pp.663-667.
- 須藤隆一編(2000): 環境修復のための生態工学, 講談社サイエンティフィック, p.42,229.
- 生態系工学研究会(編)(2009): 大阪湾ー環境の変遷と創造ー, 恒星社厚生閣, 137p.
- 瀬戸内海研究会議(編)(2007): ー新たな視点による再生方策ー瀬戸内海を里海に, 恒星社厚生閣, 109p.
- 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ー閘門・水門を利用した流況制御・水質改善実験ー, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.757-762.
- 兵庫県(2007): 尼崎シーブルー事業計画検討会資料, p.5.
- 三好真千, 上月康則, 三好順也, 山口佳奈子, 宮地由紀, 村上仁士(2007): 大阪湾湾奥でのワカメ育成とその循環的利用に関する実験, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.949-954.
- 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.
- 森紗綾香, 山中亮一, 上月康則, 中西敬, 平井研, 一色圭佑, 前田真里, 上嶋英機, 田尻和行, 垣内桂(2011): 尼崎運河における水質汚濁と水環境再生を主題とした環境教育の波及効果, 沿岸域学会誌, Vol.23 No.2, pp.63-74.
- 柳哲雄(2004): 貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響, 海の研究, 第 13 巻 5 号, pp.451-460.

- 柳哲雄(2005)：瀬戸内海-里海学入門，瀬戸内海環境保全協会，pp.1-69.
- 柳哲雄(2006)：里海論，恒星社厚生閣，東京，102p.
- 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.
- 山中亮一，上月康則，一色圭佑，森紗綾香，川井浩史，石垣衛，上嶋英機，高橋秀文(2010)：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，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.66，No.2，pp.1201-1205.

## 第 2 章 尼崎運河の水環境特性

### 2.1 緒言

研究対象地である大阪湾北東最奥部の尼崎港内に位置する尼崎運河は、閘門と水門により外海との海水交換が制限された閉鎖性汽水域である。兵庫県尼崎市の南部は大半が「海拔ゼロメートル地帯」であり、昔から高潮や波浪による被害を受けてきた。このような高潮の侵入を防ぐため、尼崎運河内は閘門と水門により水位管理が行われている。高度経済成長期前より阪神工業地帯における航路として利用されてきた歴史があり、現在でも運河周辺には多数の工場が立地している。本運河は「瀬戸内海環境保全特別措置法」(以下、瀬戸内法)の適用海域であり、周辺の事業所は厳しい排水基準を遵守しているが、閉鎖性の高い海域であるため工場排水は外海との海水交換により希釈され難い傾向がある。さらにエコトーンが直立海岸構造物により分断されているため生態系も単調であり、生物による物質循環が滞っており、水質の汚濁化が生じている。そのため、水質は冬期においても赤潮が発生し透明度が低下する日もあり、大阪湾内沿岸域でも特に水質汚濁が深刻な場所である(上嶋ら, 2005)。2015 年 9 月に瀬戸内法が改正され、新たに貧酸素水塊の発生機構の解明およびその防除技術の開発に努めることや環境状況の定期的な調査を実施し、結果を法の適正な運用に活用することなどが追加された。このように水質汚濁機構の解明および解消は汚濁した海域における喫緊の課題と位置づけられている。

本章では、表 1.3 の評価指標の水質(底層 DO, 透明度, TN, TP)に着目し、尼崎運河内の水質特性と汚濁化の要因を明らかにする。また、本運河から得られる「生態系サービス」に関わる水質特性を抽出し、「生態系サービス」を享受するために必要な水質改善の目標や手法について考察を行う。

なお、尼崎運河の水質特性については、森(2010)により取りまとめられており、尼崎運河の水質は依然として環境基準の海域類型Ⅳを上回っており、赤潮、貧酸素化、有機汚泥の堆積が発生していること、様々な要因による水質汚濁状況から、いくつかの水質改善手法を効果的に組み合わせる必要があることは明らかにされている。本研究は、親水性を低下させている透明度低下および生物多様性が劣化している要因

について新たに明らかにすることを目的としている。

## 2.2 現地調査・実験方法

### 2.2.1 水質

兵庫県尼崎市尼崎運河北堀地区(以下、北堀運河)において、水質環境を把握するための調査を行った。調査地点は図 2.1、写真 2.1 に示す閘門内外の 2 地点(St.A, St.B)で実施した。各地点における全水深は St.A は 3.6m, St.B は 10m である。調査は 2008 年から 2015 年まで 2 月, 5 月, 8 月, 11 月に実施した(表 2.1)。調査項目は多項目水質分析計(ALEC 社製: AAQ1186, Hydrolab 社製: MiniSonde-5)を用いて、溶存酸素濃度(以下, DO), 水温, 塩分, pH, 酸化還元電位(以下, ORP), クロロフィル *a*(以下, Chl.*a*), 光量子の鉛直分布の観測を行った。また、海水の密度を海洋観測指針に従い算出した。同時に、水質分析に供するため水面下 -0.5m および、海底上 +1.0m の水深で採水した。採水した試料は、採水後現地で速やかに濾過し(Whatman GF/C), 冷暗保存した後、実験室に持ち帰り、全窒素(以下, TN), 全溶存態窒素(以下, DTN), 亜硝酸+硝酸態窒素(以下, NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>-N), アンモニア態窒素(以下, NH<sub>4</sub>-N), 全リン(以下, TP), 全溶存態リン(以下, DTP), リン酸態リン(以下, PO<sub>4</sub>-P=DIP)を TNTP オートアナライザー(BLTEC 社製: AACS-V)により分析を行った。また、NH<sub>4</sub>-N と NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>-N の合計値を溶存態無機窒素(以下, DIN)とし、DTN から DIN を差し引いた値を溶存態有機窒素(以下, DON), TP から DTP を差し引いた値を懸濁態リン(以下, PP), DTP から DIP を差し引いた値を溶存態有機リン(以下, DOP)とした。濾過に使用した濾紙は、100℃で乾燥させ、デシケータ内で塩酸処理にて炭酸塩を除去し、CN コーダ(Thermo Finnigan 社製: NC Soil Analyzer)を用いて懸濁態有機炭素(以下, POC)および懸濁態窒素(以下, PN)の分析を行った。

また、一次生産量の測定を明暗瓶法に従い行った。設置水深は、2008 年 3 月～6 月まで、Chl.*a* の最大水深と無光層の 2 水深に設置し、2008 年 7 月以降は、水面の光量子が 10%, 50%, 90%減少した 3 水深に設置した。明瓶と暗瓶の DO の差から総光合成量(総生産量), 呼吸量は明瓶の DO と採水時の DO の差, 純光合成量(純生産量)は明瓶と採水時の DO の差から求めた(木本ら, 1986)。また、得られた光合成量を垂下時



間で除することで単位時間あたりの値(速度)を算出した．これに日出から日没までの時間を乗じて1日あたりの総光合成量を求めた．同様に，単位時間あたりの呼吸量に24時間を乗じることで，1日あたりの呼吸量，1日あたりの総光合成量から1日あたりの呼吸量を減じたものを1日あたりの純光合成量とした．さらに，水中あたりの純光合成量( $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ )は実測層間で一定と仮定して積算し求めた．また，炭素の生産量は光合成商を1.25 (John H, 1956)として算出した．なお，DOの測定はウィンクラー法(黒木，1982)に準じた．

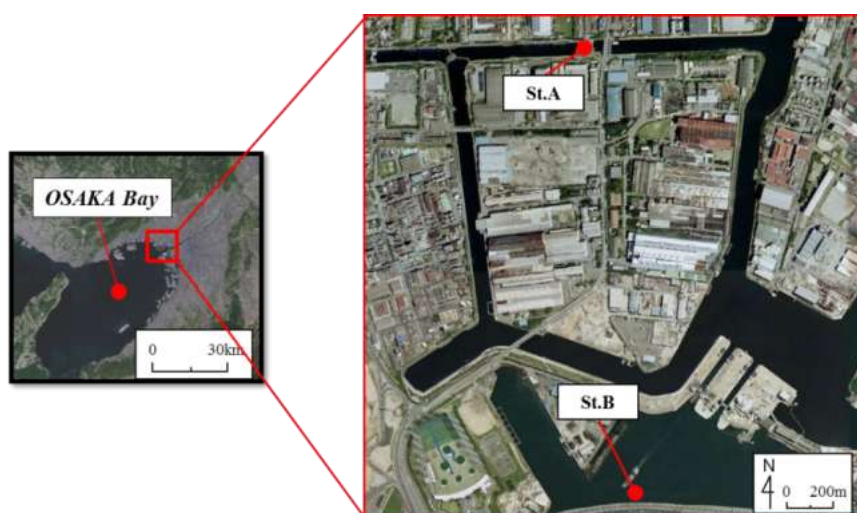


図 2.1 水質調査地点



a)St.A



b)St.B

写真 2.1 水質調査地点

表 2.1 調査日における気象条件(大阪)

調査日	平均気温 (°C)	日照時間 (hr)	日射量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ )	降水量 (mm)	天気概況	
					昼 【6:00-18:00】	夜 【18:00-翌日6:00】
2008/2/22	5.1	5.4	560	0	薄曇	曇
2008/5/27	20.0	12.7	1338	0	晴	薄曇
2008/8/29	28.4	1.4	545	7	曇	雨一時曇
2008/11/25	13.4	6.8	473	8	晴後時々曇	晴時々曇
2009/2/19	7.9	1.3	414	6	曇一時晴	雨
2009/5/20	19.7	10.3	1182	0	晴後薄曇	曇
2009/8/18	27.6	3.3	1149	0	晴後一時薄曇	薄曇後一時晴
2009/11/16	13.6	2.0	325	0	曇一時晴	曇後雨
2010/2/25	7.8	6.2	642	0	曇	曇後時々雨
2010/5/17	18.8	11.8	1230	0	晴	曇一時晴
2010/8/31	30.5	12.3	1126	0	晴	晴
2010/11/25	13.2	5.2	412	0	曇	曇
2011/2/28	11.0	0.3	145	41	雨時々曇	曇一時晴
2011/6/3	22.2	6.0	1031	0	薄曇	曇
2011/8/24	29.5	9.2	1193	0	曇	曇時々雨
2011/11/22	10.4	9.1	637	0	晴	曇時々晴
2012/2/22	8.5	2.5	394	5	曇時々晴後一時雨	雨
2012/5/28	23.1	9.8	1348	0	晴	晴一時雨
2012/8/22	29.6	9.6	1175	0	晴一時曇	曇後一時晴
2012/11/19	11.6	8.3	653	0	晴	晴時々曇
2013/2/27	7.7	3.5	514	3	曇一時雨後晴	晴後薄曇
2013/5/1	12.9	6.9	1093	0	晴一時曇	晴一時曇
2013/8/27	26.7	8.1	984	0	晴一時曇	晴後一時薄曇
2013/11/25	15.1	0.0	74	28	曇時々雨	晴
2014/2/27	11.6	0.1	210	10	雨時々曇	曇時々霧雨一時雨
2014/5/18	21.1	13.2	1432	0	晴時々薄曇	晴一時薄曇
2014/8/21	30.1	2.9	884	0	曇	曇後一時晴
2014/11/28	14.6	5.9	515	0	晴時々曇	曇時々雨
2015/2/26	8.9	0.0	156	13	雨	曇一時雨
2015/6/3	21.8	0.0	277	45	曇時々雨	晴一時曇
2015/8/8	30.3	10.0	1267	13	晴後一時雨、雷を伴う	晴一時曇
2015/11/15	17.7	2.3	377	4	曇時々雨後時々晴	晴

## 2.2.2 生物

運河内の生物調査として、St.Aにおける鋼管(写真 2.2)に付着する生物の被度(一定の面積内に占める生物の割合)を、潜水作業によって水面下 -0.0m ~ -3.5m 水深にて 0.5m 間隔で行った。被度はコドラート(0.15cm×0.20cm)を用いて目視観察により観測した。調査は 2008 年 6 月から 2009 年 9 月までの 16 ヶ月間、毎月 1 回の頻度で行った。また、水面下 -1.5m の地点に超小型メモリー水温塩分計(ALEC 社製:MDS-CT)を設置し、水温と塩分の連続観測を行った。なお、本研究では鉛直護岸に生息する生物を対象としており、水中に生息する魚類の詳細な調査は実施できていない。また、特に水中の透明度が低下していた 2008 年 3 月、2009 年 1 月、5 月、6 月、7 月には浮遊性藻類(珪藻、藍藻、緑藻、渦鞭毛藻など)の種を同定し組成比および細胞密度を計測した。

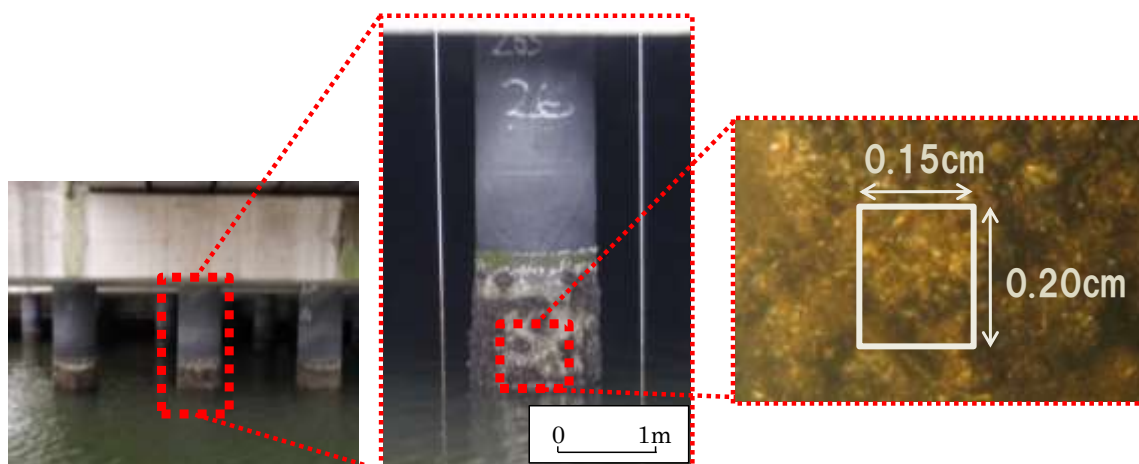


写真 2.2 生物の被度調査を行った鋼管

### 2.2.3 底質

2010 年 8 月にセジメントトラップを用いて運河内(St.A)における沈降物量を調査した。セジメントトラップには、口径 8.5cm(面積  $0.023\text{m}^2$ )、高さ 30cm のプラスチック製容器を用い、管理水面下 1.5m に 24 時間設置した。容器内にはチモールを 5mg 投入し、容器内での生物活性を抑制した(写真 2.3)。セジメントトラップで捕集した沈降物は、実験室に持ち帰り、1500rpm で 10 分間遠心分離し乾燥重量を測定した。また、乾燥後の試料について乳鉢で粉末状になるまで磨り潰した後、1N 塩酸を入れ、攪拌し 1 日置いた。その後、6N 塩酸を入れ、試料を攪拌させ酸処理を行った後に、POC および PN を CN コーダ(Thermo Finnigan 社製：NC Soil Analyzer)を用いて分析した。また、海水および懸濁物における酸素消費量はウィンクラー法(黒木, 1982)により算出し、沈降物と堆積物における酸素消費量は、三好ら(2007)の方法に従い算出した。

次に、底質の酸素消費量の現地測定方法の概要を図 2.2 に示す。実験は 2009 年 9 月 15 日の日中に St.A にて実施した。酸素消費量の測定は、遠藤ら(2008)の方法に従い、チャンバー法により実施した。まず、酸素が豊富な運河内表層の海水(DO：7.0mg/L)でチャンバー(容積：10.0L、底面積： $0.057\text{m}^2$ )内を満たした後、潜水土により海底にチャンバーを設置した。本実験で表層水を用いた理由は、底層水が表層水程度に改善された場合の内部負荷量を把握することを目的としているからであり、得られた結果は現状の底層水に対する内部負荷量としては過大評価になっている可能性はある。本チャンバー内には多項目水質計(Hydrolab

社製：MiniSonde-5)が設置されており，DO，水温，塩分，ORP，pHを1分間隔で連続測定した．また，チャンバー内には水中モーターが取り付けられており，チャンバー内DO濃度の均一化ができる構造である．また，海水のみの酸素消費量を測定するため，円筒形(直径13cm，高さ23cm，容積3L)のプラスチック製容器を同水深に設置し，実験開始前後のDO濃度を測定した．チャンバー内のDO減少量から海水のみのDO減少量を差し引き，底質による酸素消費量を算出した．

次に，酸素消費量の測定に用いた同様のチャンバーを用いて，底泥からの栄養塩溶出量の測定を行った．図2.3に現地測定方法の概要を示す．底層の海水で満たした状態で海底に設置し，30分ごとに採水用チューブからチャンバー内海水を採水した．採水した試料は，現地で速やかに濾過し(Whatman GF/C)，冷暗保存した後，実験室に持ち帰り， $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ ， $\text{NH}_4\text{-N}$ ，DIPをTNTPオートアナライザー(BLTEC社製：AACS-V)により分析を行った．同時に水中の硫化水素( $\sum \text{H}_2\text{S}=\text{H}_2\text{S}+\text{HS}^-$ )を管原ら(2010)に従い測定した．



写真 2.3 セジメントトラップ

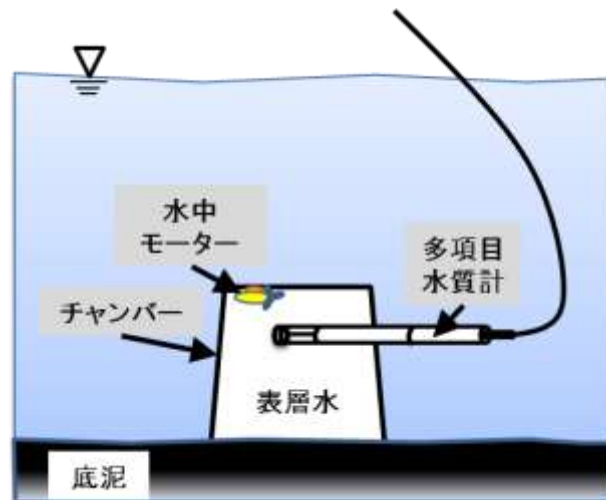


図 2.2 酸素消費量測定方法の概要

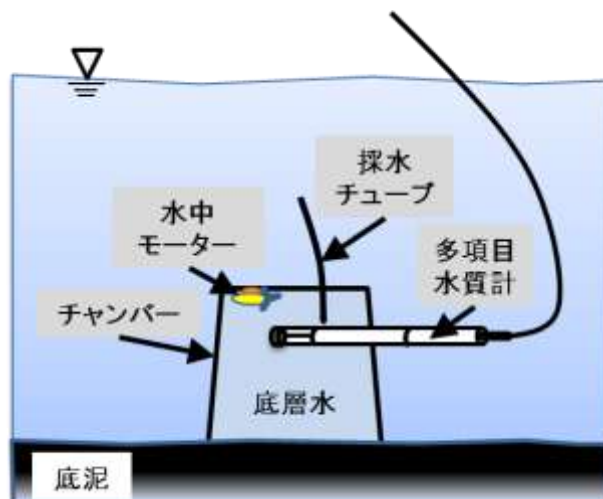


図 2.3 栄養塩溶出量測定方法の概要

## 2.3 結果および考察

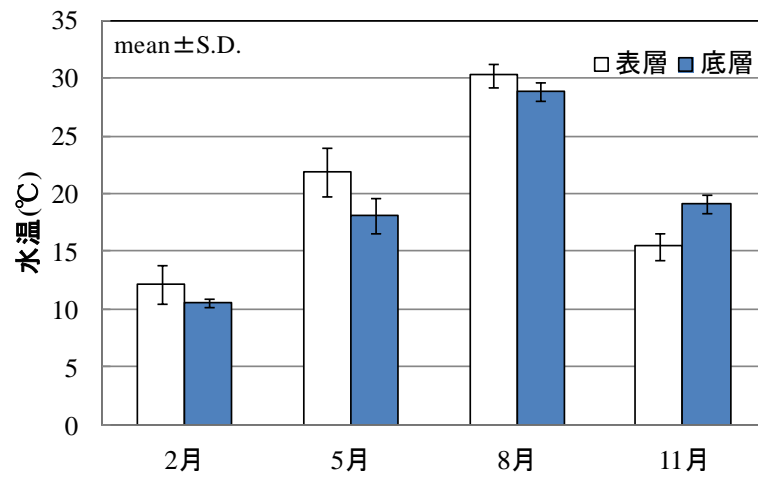
### 2.3.1 水質の季節変動特性

北堀運河内の St.A における表層(水面下-0.5m)および底層(海底上+1.0m)の水温，塩分，密度の季節変動を図 2.4 に示す．なお，2008 年から 2015 年までの 2 月，5 月，8 月，11 月における平均値と標準偏差を示している．

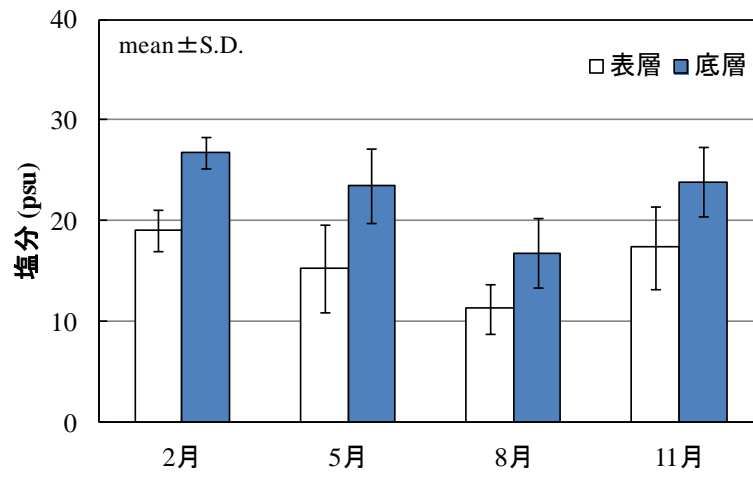
運河内の水温の季節変化を見ると，平均水温の年間の変動幅は表層で 13～30℃，底層では 10～29℃となっており，わずかではあるが底層



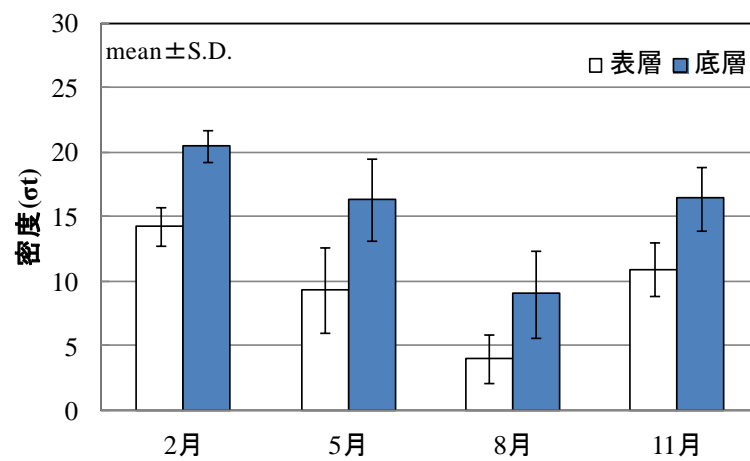
の方が変動幅は大きかった．水温の表底差は 5 月がもっとも大きく約 9℃であり，11 月には水温逆転が生じていた．塩分はいずれの季節でも表層が低く，8 月が最も低塩分であった．塩分の表底差は 5～8psu であり，水温逆転が生じる 11 月でも表層の方が低塩分であった．塩分の季節変化の要因としては，一般には，事業所系の排水(淡水流入)，河川水の流入，地下水流入，降雨，接続海域との水交換，残差流構造が挙げられる．尼崎運河では，事業所系の排水は 1 日あたり約 30,049m<sup>3</sup> 流入しており(表 2.2)，表層(水深 2m まで)の塩分の理論上の希釈量としては，1 日あたり 1.9psu の低下が見込まれる(海水交換なし，運河表層の海水量約 414,000m<sup>3</sup>(=尼崎運河全長 6.9km×平均幅 30m×水深 2m)，平均塩分を 20psu と仮定し算出した)．降雨については，年間総雨量(大阪)は 1,500mm であり，理論上の希釈量は 1 日あたり 0.2psu の低下が見込まれる．接続海域との水交換は，閘門操作により開放時間と閘門内外の密度プロファイルの相違により生じる密度流(エスチュアリー循環)と水位差によるバロトロピック流れに支配されていると推測される．森ら(2009)によると本運河において水門操作は前面海域の潮位が運河の管理水位よりも下がった場合に開門し，このときに海水交換が行われる．日本の潮位は夏期に高く，冬期に低くなるため，管理水位よりも前面海域の潮位が低い時間が冬期のほうが長くなる．そのため，冬期における海水交換時間が長くなり，運河内に高塩分の海水が流れ込む量が増加すると考えられる．閘門の内外での同水深帯(水面下 -0.5m，-3.0m)の密度差を密度プロファイル(図 2.5)で比較すると，特に水面下 -3.0m の密度流として，尼崎港から尼崎運河に流入する水塊の塩分は 2 月は 29psu，5 月は 30psu，8 月は 26psu，11 月は 31psu と見込まれ，冬期の方が夏期に比べて高塩分水塊が流入しやすい状況となっている．エスチュアリー循環の強さは，水面下 -0.5m と -3.0m の閘門内外の密度差を季節ごとに比較することで推察され(図 2.6)，尼崎運河では水面下 -0.5m では 11 月に最大となり，水面下 -3.0m では 8 月が最も強くなると考えられた．以上より，尼崎運河の塩分の主たる規定要因としては，事業所からの排水，尼崎港の塩分構造と潮位の季節変化が挙げられることがわかった．



a) 水温



b) 塩分

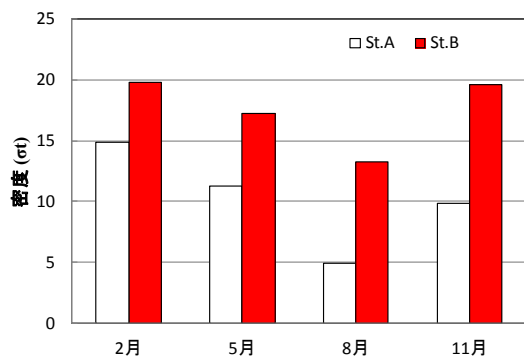


c) 密度

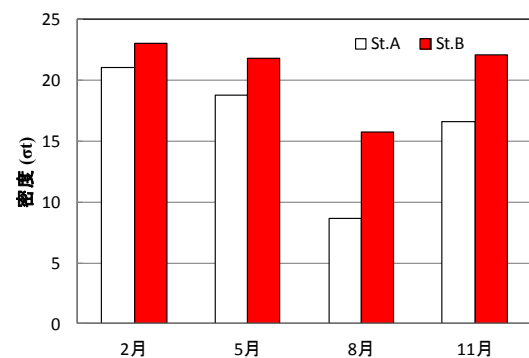
図 2.4 St.A における水温，塩分，密度の季節変動

表 2.2 尼崎運河の大規模事業所排水データ (尼崎市, 2007)

データ	数(社)	排水量(m <sup>3</sup> /日)				TN	TP
		最小値	～	最大値	合計	平均値 (mg/L)	平均値 (mg/L)
西堀運河	1	3,474	～	3,474	3,474	4.6	0.06
北堀運河	3	42	～	901	1,012	32.5	0.11
中堀運河	2	456	～	2,867	3,323	18.5	0.79
蓬川	2	473	～	1,155	1,628	14.5	0.06
旧左門殿川	7	75	～	4,280	10,709	8.2	0.11
東堀運河	2	41	～	9,862	9,903	9.4	0.04
合計(平均)	17	41	～	9,862	30,049	(10.5)	(0.15)



a)水面下-0.5m



b)水面下-3.0m

図 2.5 St.A, St.B における密度の季節変動(2012 年)

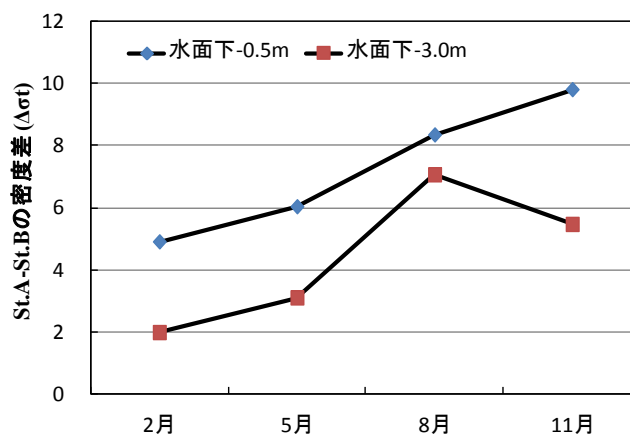


図 2.6 同水深帯における St.A と St.B での密度差(2012 年)



次に St.A における DO, Chl.*a* の季節変化を図 2.7, 図 2.8 に示す. 運河内表層では, 年間を通して DO は 7~15mg/L と高く, 冬期が最も高くなった. 同様に Chl.*a* も冬期が高く, 赤潮状態といわれる 50 $\mu$ g/L を超える値を示すこともあった. 他の閉鎖性内湾では春期と秋期にブルームが発生することが多く, 尼崎運河は他の海域と異なる内部生産の特性を有していると言える. 図 2.9 に同地点における透明度と Chl.*a* が最大値を示す水深帯までの積算 Chl.*a* 量の季節変動を示す. Chl.*a* は春期と夏期および冬期にブルームが発生していることがわかる. ブルームの発生に合わせ透明度は最低 0.5m まで悪化することがわかった. 図 2.10 に積算 Chl.*a* 量と透明度の関係を示す. 積算 Chl.*a* 量と透明度の間には負の相関( $R=0.47$ )があり, 相関は低いが植物プランクトンの増殖により透明度は低下傾向にあり, 植物プランクトンの増殖が一つの要因であることが示唆された.

図 2.11 に海底上+0.3m における DO および ORP の経月変化を示す. 海底直上における DO は, 春期末から貧酸素化(3.5mg/L 以下)が始まり, 夏期から秋期にかけては常時貧酸素化していることがわかる. 特に貧酸素化が悪化する夏期には, DO が 1mg/L 以下の無酸素状態になることもあった. ORP は DO と同様の経月変化がみられ, 夏期においては -200mV となり, 還元的な環境になっていることがわかる. 一方で, 冬期においては, 貧酸素化は解消される年もあり, 底層においても十分な酸素が供給されていることがわかる. これは水温低下にともなう, 運河底泥におけるバクテリアなどの分解者の活性低下により, 酸素消費が減少していることや, 水温逆転による成層強度の低下にともなう鉛直混合が要因であると考えられる.

St.A, St.B における 2011 年 2 月, 5 月, 8 月, 11 月における水温, 塩分, DO, Chl.*a*, pH の鉛直分布を図 2.12, 図 2.13 に示す. 水温と塩分に起因する密度成層を境界に急激な DO の低下がみられる. St.A と St.B の底層 DO を比較すると, 8 月においては両地点ともに貧酸素化しているが, 2 月, 5 月, 11 月は St.A のみ貧酸素化していることがわかる. このことから, 外海においては鉛直混合による表層から底層への酸素供給が成されているが, 運河内は前述したように鉛直方向の流動が小さいため, 底層の貧酸素化が四季を通して継続する年もあることがわかった. また, Chl.*a* の増減に合わせ, DO および pH の鉛直分布の傾向は類似していることから, 植物プランクトンによる一次生産が活発に行われていると考えられる. 一般的に, 水中の pH は炭酸イオンの

変動に影響を受け、植物プランクトンの光合成により、水中の炭酸イオンが消費されると、pHが上昇する。このことから、表層のDO変化の主たる要因は、植物プランクトンの活性が影響しているといえる。

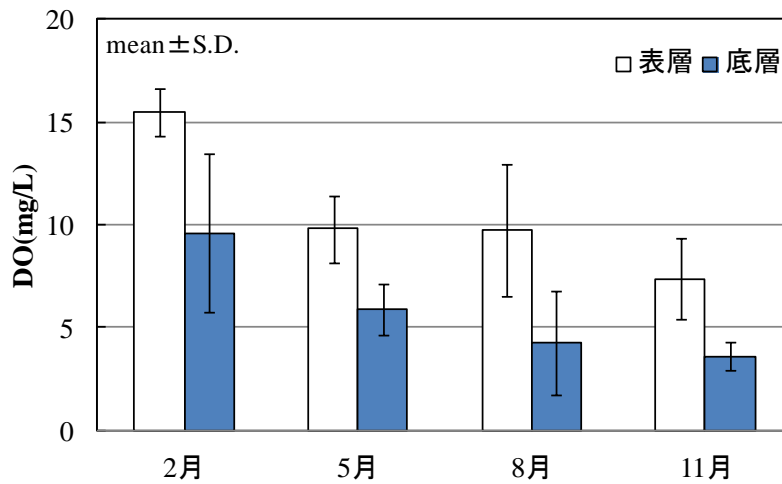


図 2.7 St.A における DO の季節変動

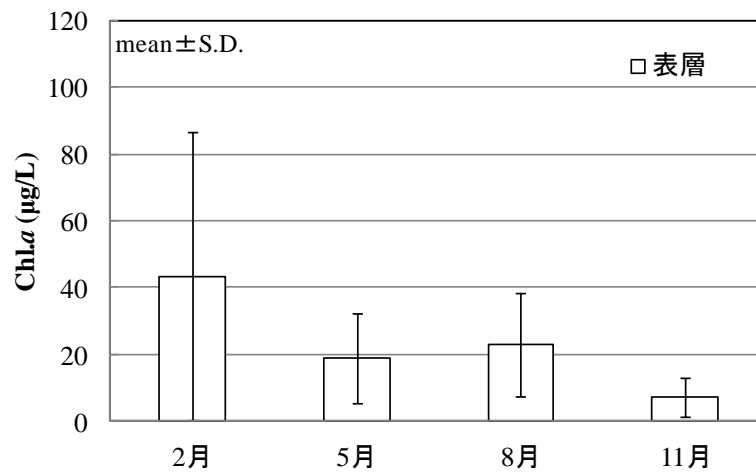


図 2.8 St.A における表層 Chl.*a* の季節変動

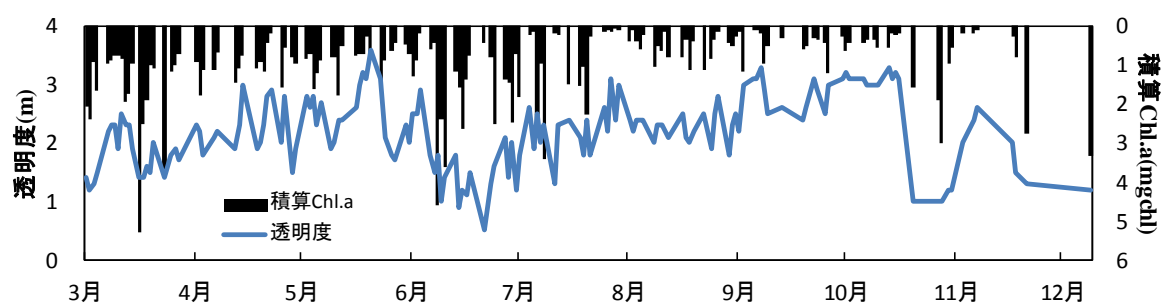


図 2.9 St.A における透明度と積算 Chl.a 量の季節変動  
(2014 年 3 月～12 月)

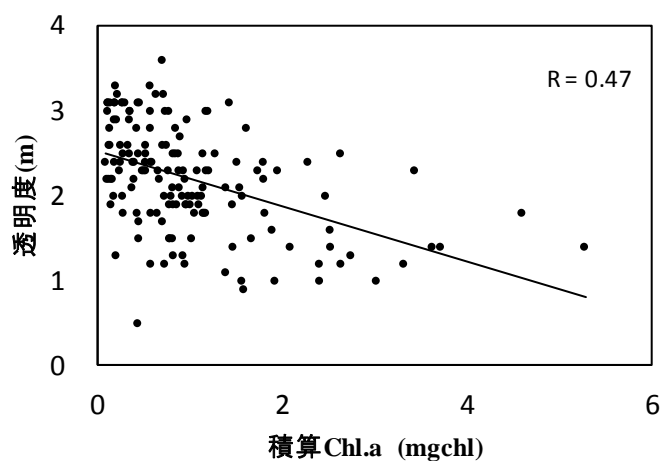


図 2.10 St.A における積算 Chl.a 量と透明度の関係

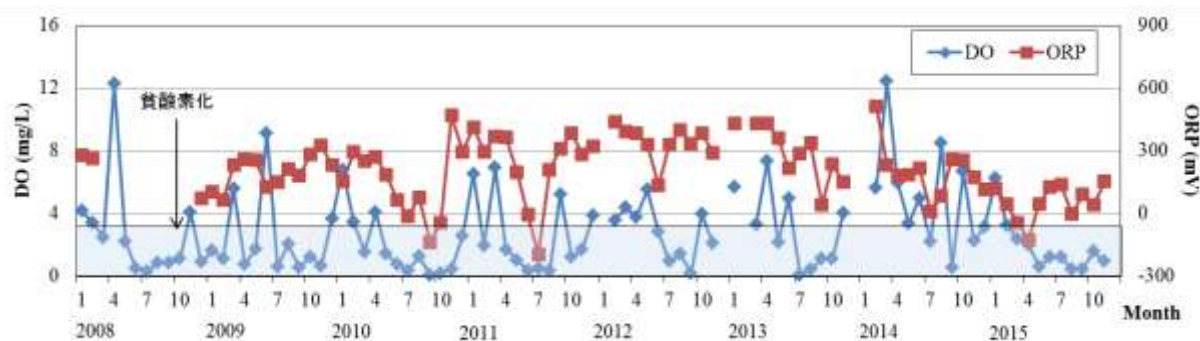


図 2.11 St.A における海底上+0.3m での DO と ORP の経月変化

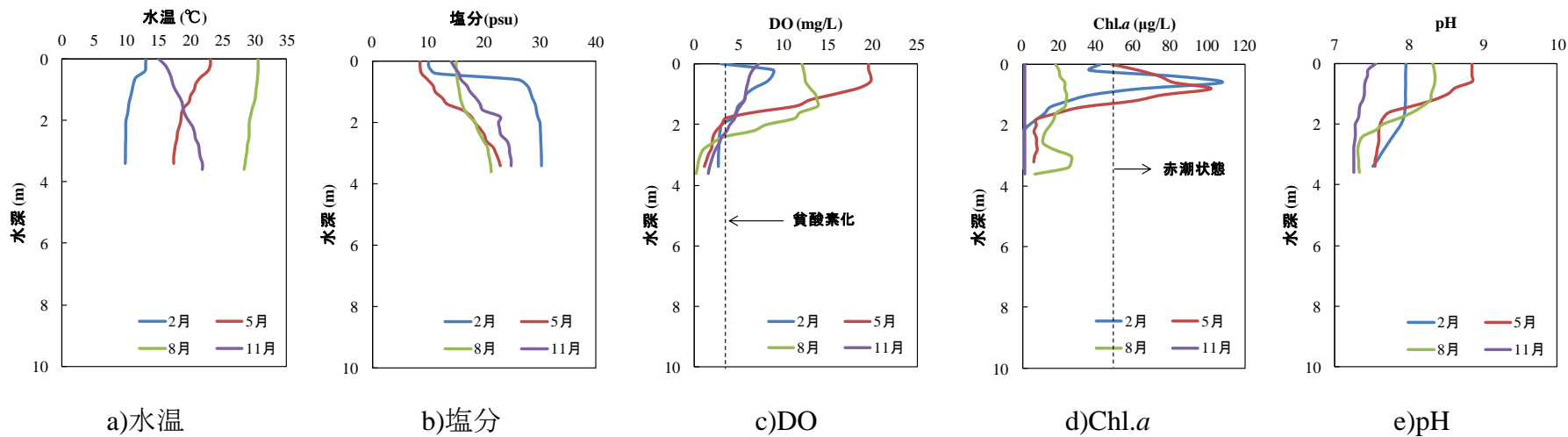


図 2.12 St.A における水温，塩分，DO，Chl.a，pH の鉛直分布 (2011 年 2 月，5 月，8 月，11 月)

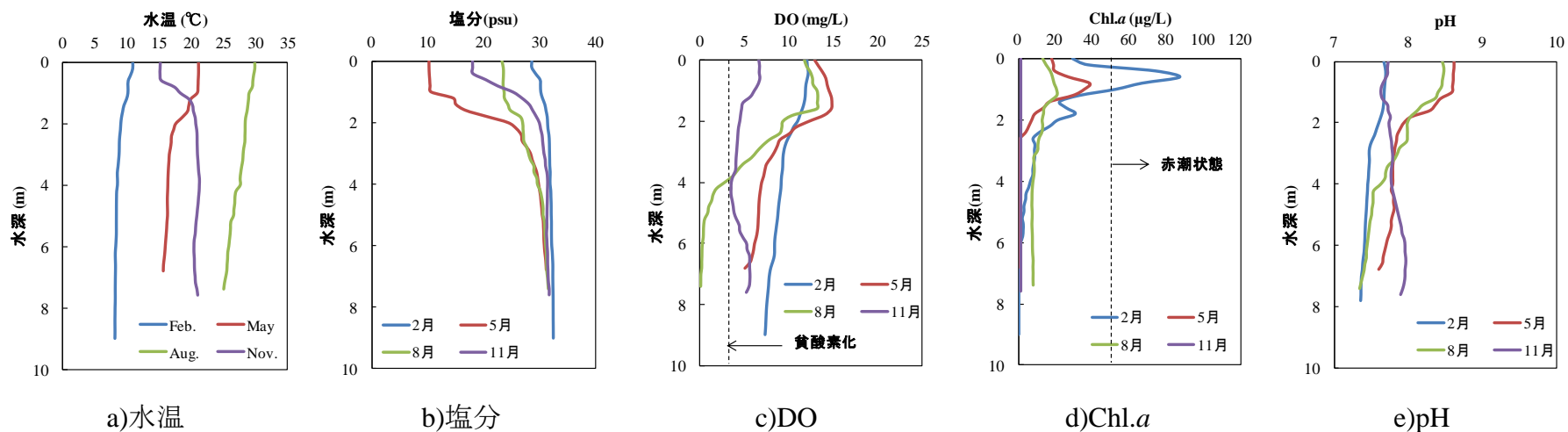


図 2.13 St.B における水温，塩分，DO，Chl.a，pH の鉛直分布 (2011 年 2 月，5 月，8 月，11 月)

St.A における 2008 年 3 月から 2009 年 1 月までの一次生産量を測定した結果を図 2.14 に示す．運河内の一次生産量は  $0.45 \sim 7.89 \text{ gC/m}^2/\text{day}$  の値を示しており，日射量と正の相関( $R=0.67$ )を示した(図 2.15)．一次生産量の減少した 9 月，10 月，11 月は現地調査時に雨が降り，日射量が少なく，一次生産量も減少した．本運河における一次生産量は 5 月に最大値  $7.89 \text{ gC/m}^2/\text{day}$  を示し，測定期間中に Chl.*a* が約  $12 \mu\text{g/L}$  増加しており，短時間で Chl.*a* が最大となっていた．これは，春期に短時間で極大となる春の大増殖(春季ブルーム)の影響が考えられた．また，呼吸量は 4 月の値を除いて気温と高い相関があり，気温の高い夏季に最大値を示す傾向が見られた(図 2.16)．表 2.3 より，大阪湾の一次生産量は  $0.44 \sim 2.29 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ (日本水産資源保護協会，2002)であり，平均値を比較すると約 3.0 倍の差があり，本運河における一次生産量が大阪湾広域と比較して高いことがわかった．

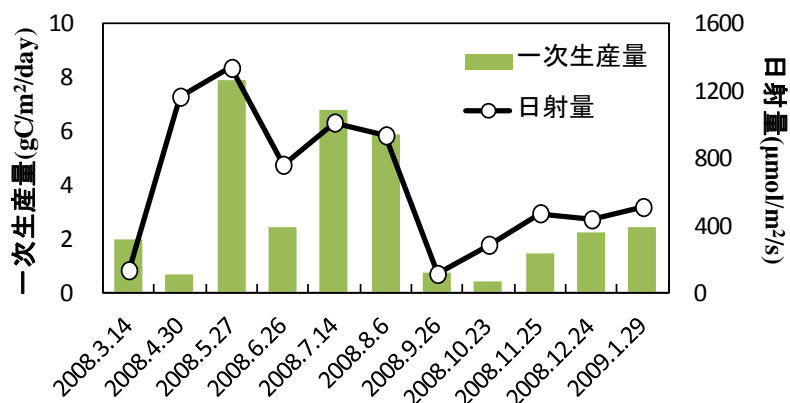


図 2.14 一次生産量と日射量の経月変化

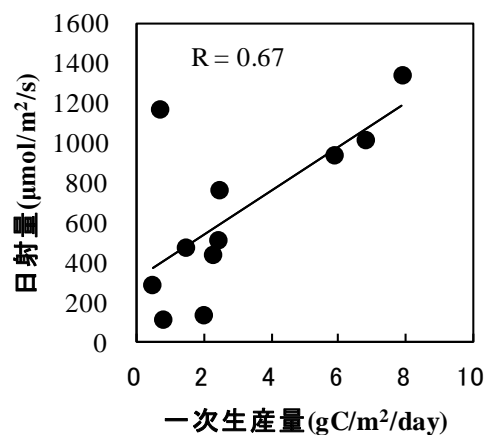


図 2.15 日射量と一次生産量の関係

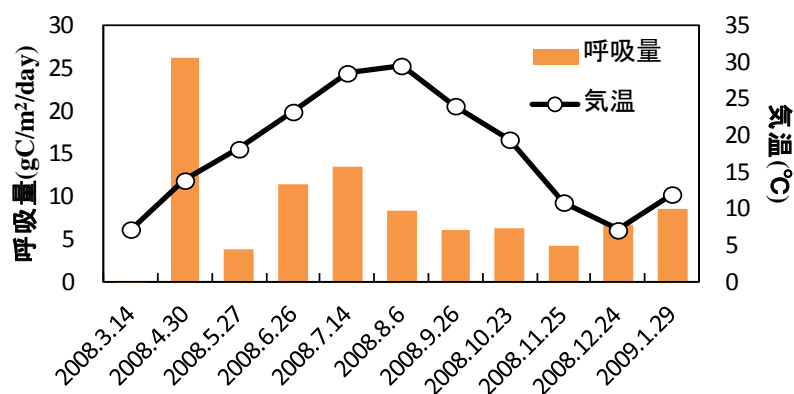


図 2.16 呼吸量と気温の経月変化

表 2.3 大阪湾の基礎生産測定結果(日本水産資源保護協会, 2002)

調査年月	調査海域	大阪湾測定海域	調査方法	基礎生産量 (gC/m <sup>2</sup> /day)
昭和 38 年 9 月	瀬戸内海 東部海域	大阪湾中央部, 南部の 2 点	C <sup>14</sup> 法	0.48～0.82 (平均 0.65)
昭和 53～ 54 年	大阪湾東部海 域	3～6 定点	酸素法	0.86～4.07 (平均 1.98)
昭和 54～ 55 年	瀬戸内海	湾奥部, 湾西部 2 点	C <sup>14</sup> 法	0.03～1.00 (平均 0.44)
昭和 55～ 56 年	大阪湾	湾奥部, 中央部, 湾口部, 3 点	酸素法	1.24～2.55 (平均 2.29)
平成 5～ 6 年	瀬戸内海全域	大阪湾奥部, 南西部	C <sup>13</sup> タンク 法	0.2～2.0 (平均 1.23)
平成 10～ 11 年	大阪湾	関西国際空港 北西側地先	酸素法	0.31～5.50 (平均 2.10)

次に, St.A での表層における TN, TP 濃度と Chl.a の季節変動, 底層における TN, TP 濃度と DO の季節変動について, 図 2.17, 図 2.18 に示す. 栄養塩の変動要因として一般的には, 外部負荷, 内部負荷, 内部生産があり, それぞれについて考察する. 外部負荷については, 本運河は工場地帯にあるため事業所排水が常時流入している. 表 2.2 より

尼崎運河全体では一日あたり TN は 439.2kg, TP は 5.9kg が外部負荷として流入しており, 本調査地点である北堀運河では一日あたり TN は 32.9kg, TP は 0.1kg が流入している(尼崎市, 2007). この外部負荷量は, 海水交換がなく, 表層(水面下-0.5m)に拡散すると想定した場合, 表層の栄養塩濃度を TN で 4mg/L, TP で 0.11mg/L まで一日で上昇させる量に相当し, 膨大な負荷源であることがわかる(運河表層の海水量約 15,000m<sup>3</sup>(=北堀運河全長 1km×平均幅 30m×水深 0.5m), 平均 TN 濃度を 2mg/L, 平均 TP 濃度を 0.1mg/L と仮定し算出した). 図 2.17a)と図 2.18a)より TN は表底層ともに同様の値を示していたが, TP は夏期の底層で高くなる傾向がみられた(図 2.17b), 図 2.18b)). TN においては外部負荷の影響が顕著にみられる. TP については内部負荷による影響と推測される. 一般的に底質からのリンの溶出による内部負荷の経路は大きく 2 つに分けられる. 第一は動植物プランクトンに由来するデトリタス等の有機物分解に伴ったリンの可溶化である. 第二はリン酸鉄(Ⅲ)およびリン酸を吸着した鉄(Ⅲ)やマンガン(Ⅳ)の水和酸化物が貧酸素下で還元され, 水中へ溶解されるものである. 図 2.18 より, DO が低下した貧酸素期において底質の栄養塩濃度が増大していることから, 底質からの溶出にともなう内部負荷の影響であると考えられる. 実際にリンの溶出量をチャンバー法にて測定した結果, 151.0mg/m<sup>2</sup>/day であり, 大阪湾での報告(城, 1983)と比べて高い結果となった(底泥からの溶出量については, 2.3.3 項で詳細を示す). チャンバー法による現地測定は底泥の巻き上げなどにより, 室内実験より高い数値が測定されることがあり, 今回の結果は参考値としてとらえるのが妥当であると考ええる. しかしながら, リンの負荷減として底質からの溶出は無視できないといえる. また, 図 2.17 から冬期の表層における DIN, DIP において逆の傾向が見受けられる. 表 2.2 から北堀運河に流入する事業所排水に含まれる栄養塩は窒素とリンで量的に異なり, 特に窒素は負荷源として主要なものと考えられる. そのため, 表層の窒素は植物プランクトンに全ては吸収されず表層に滞留していると推測される.

窒素についてみると, 図 2.17a), 図 2.18a)より, 表層および底層の TN は年間を通して水質環境基準Ⅳ型(TN: 1.0mg/L)上回り, 富栄養化状態であることがわかる. DIN については, 表層の DIN は夏期に比べ秋期および冬期で高くなっていた. 一方, 底層の DIN は表層とは逆に夏期および秋期に高くなる傾向がみられた. このように表層と底層において明確な季節変動による差がみられた. リンは, 図 2.17b), 図 2.18b)

より窒素と同様に表層および底層で水質環境基準Ⅳ型(TP : 0.09mg/L)を上回っており，表層に比べ底層において高濃度であることがわかる．特に夏期における底層の DIP は最高で 0.27mg/L と非常に高濃度であることがわかる．このように，リンは表層と底層における季節変動による増減は同様の傾向を示したが，窒素に比べ濃度差が非常に大きいことがわかる．運河内の表層および底層において栄養塩に濃度差が生じる要因は，外海と比べ流動が非常に小さく，鉛直混合が弱いことにある(中西ら，2007)．DIN は冬期から春期に低下しており，逆に DON が上昇する傾向が認められた．これは Chl.*a* が上昇する時期と重なっていることから，植物プランクトンの一次生産に DIN, DIP が利用され濃度が低下したと考えられる．また，図 2.19 に示すように，PN と Chl.*a* の分布はよく一致しており高い正の相関( $R=0.87$ )を示していた．この結果から表層における PN の増加は植物プランクトンの増加によるものと考えられる．

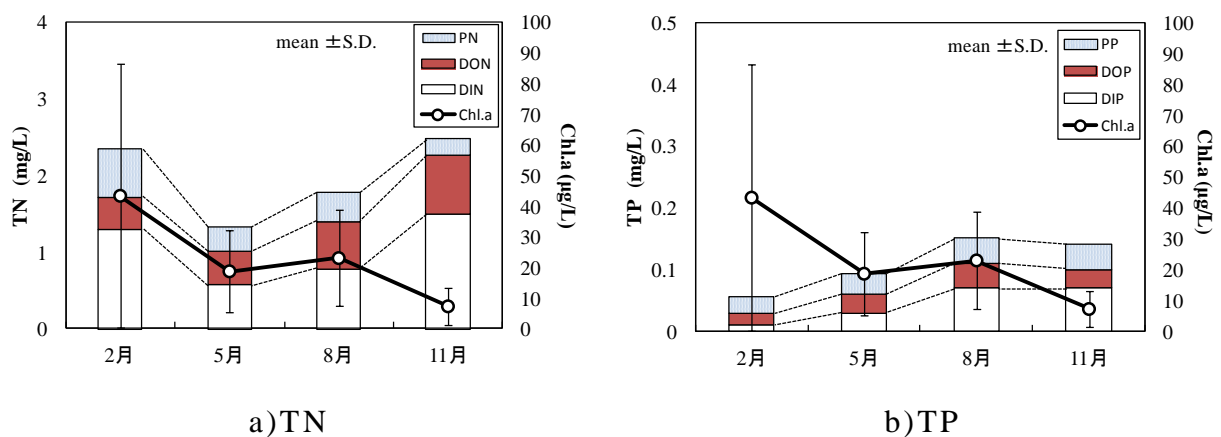


図 2.17 表層における TN,TP と Chl.*a* の季節変動

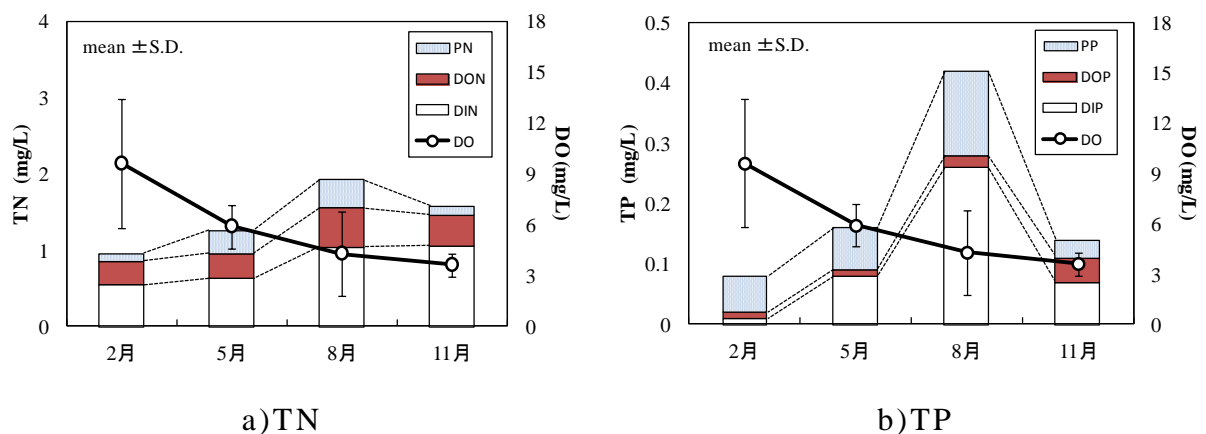


図 2.18 底層における TN,TP と DO の季節変動



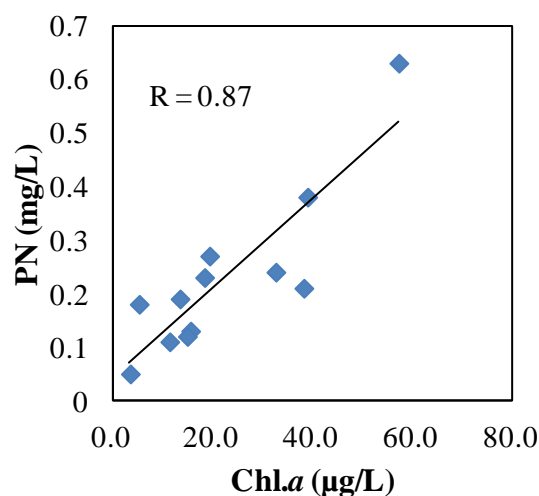


図 2.19 表層における Chl.a と PN の関係

夏期において底層の DIN,DIP が上昇することについて, 海底上+0.3m における  $\text{NH}_4\text{-N}$  および DIP と DO の関係を図 2.20 に示す. 運河内底層水に含まれる DIN の大半が  $\text{NH}_4\text{-N}$  であるため, ここでは,  $\text{NH}_4\text{-N}$  を代表値として関係性を確認する. 図 2.20 より, DO と  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $R=0.80$ ,  $t\text{-Test} : p < 0.05$ ) および DIP ( $R=0.76$ ,  $t\text{-Test} : p < 0.05$ ) との間には負の相関がみられた. この結果から, DO 上昇による好氣的条件下では底泥からの栄養塩溶出が抑制されていることが示唆された. 他の海域では底層における貧酸素環境下において硫酸還元菌の活性が高まり, 表層からの豊富な DO は成層化により供給されず, 貧酸素化を加速させるプロセスがあり, 同様の現象が尼崎運河でも生じているといえる. この結果は, Harashima *et al.* (2006) が播磨灘で実施した観測結果および小林ら (2009) が播磨灘での観測結果から示した季節変動とよく一致していた. 本運河においても, 春期と夏期に発生した植物プランクトンのブルームにより, それらが枯死・沈降し, 分解される過程で大量の DO が消費されることで底層における貧酸素化を引き起こす要因になっていると考えられた. このような貧酸素水塊を形成する要因として, ①密度成層によって鉛直混合による DO 補給が減少すること, ②水温の上昇に伴い微生物による有機物の分解が活発化し, DO 消費が増大すること, ③底泥から溶出した還元物質(硫化水素など)による DO 消費が増大すること, などが挙げられる(宗景ら, 1990).



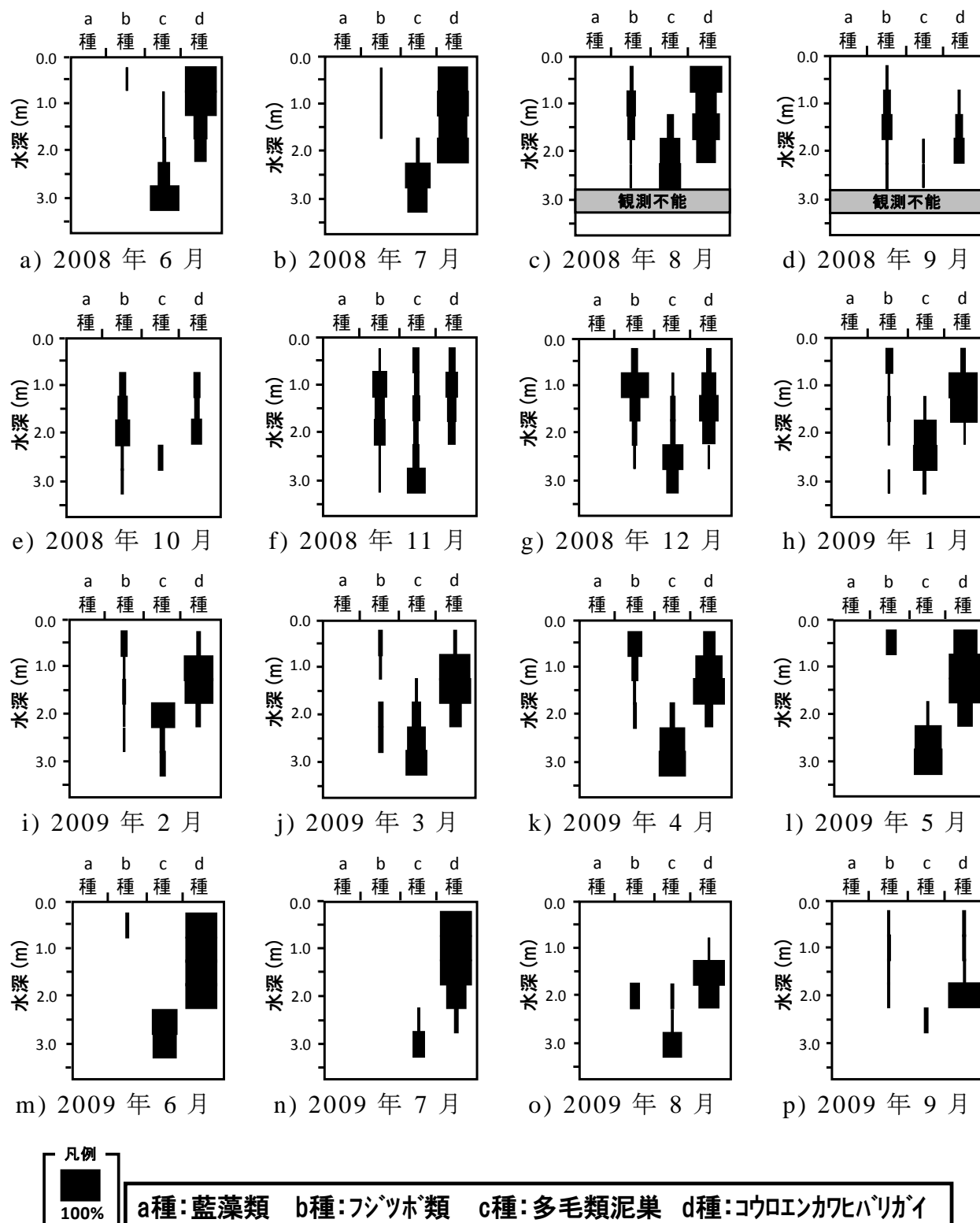


図 2.21 月ごとの水深別生物の被度(2008 年 6 月～2009 年 9 月)

次に、運河における植物プランクトンの浮遊性藻類種別の組成比と細胞密度の経月変化を図 2.22, 図 2.23 に示す。運河内の植物プランクトンは珪藻類(*Diatoms*)が 70~85%を優占しており、次いで藍藻類種組成では珪藻類の *Skeletonema costatum*(以下, *S.costatum*)が年間を通して優占種となっていた。その他に *Prorocentrum spp.*や *Noctilca spp.*などの渦鞭毛藻(*Dinoflagellates*)の種が確認された。

*S.costatum* は沿岸海洋生態系を支える一次生産者として極めて重要な地位を占めるが、一方で著しい赤潮状態になると酸欠や鰓の閉塞に伴う呼吸障害による漁業被害をもたらすことが報告されている(Ken, 1995, 吉田, 2000)。同種の増殖条件では、好適水温が 10~30℃(最適 25~30℃), 好適塩分は 3~30psu(最適 10~20psu)となり広温, 広塩性であり, さらに 111 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  以下(曇天時)でも増殖することが指摘されている(真鍋, 1979)。また, *S.costatum* は工場排水の影響に対して抵抗性が強いことも指摘されている(山田ら, 1982)。運河内の水温と塩分は *S.costatum* の増殖に適した環境条件であり, このことが同種を優占させていると要因と考えられる。

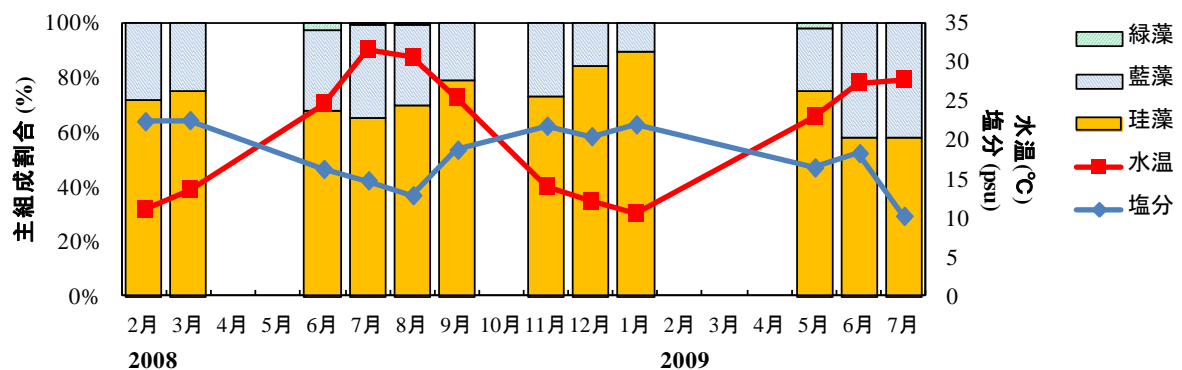


図 2.22 運河内の浮遊性藻類種の経月変化

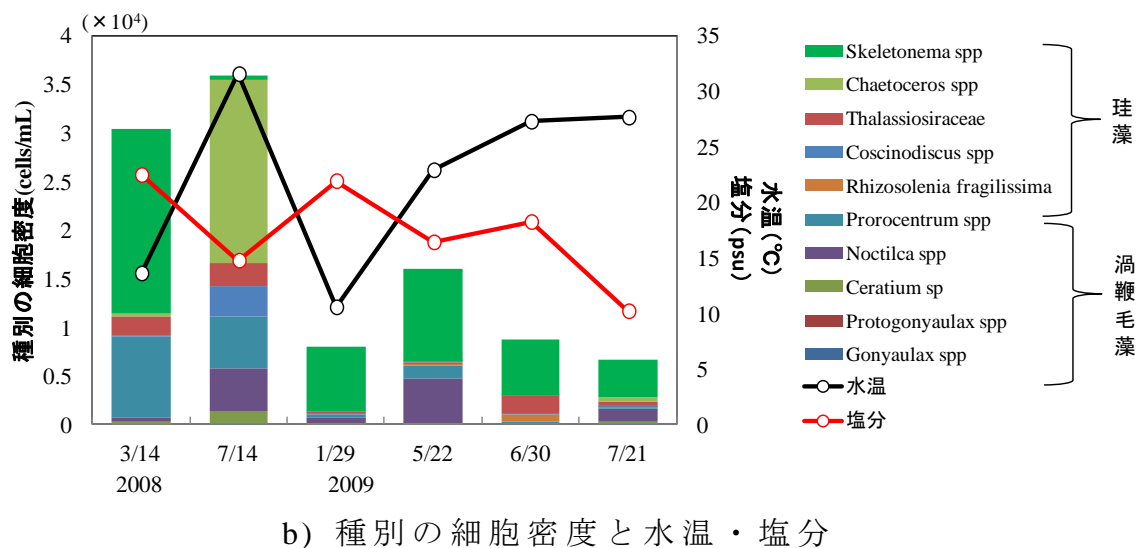
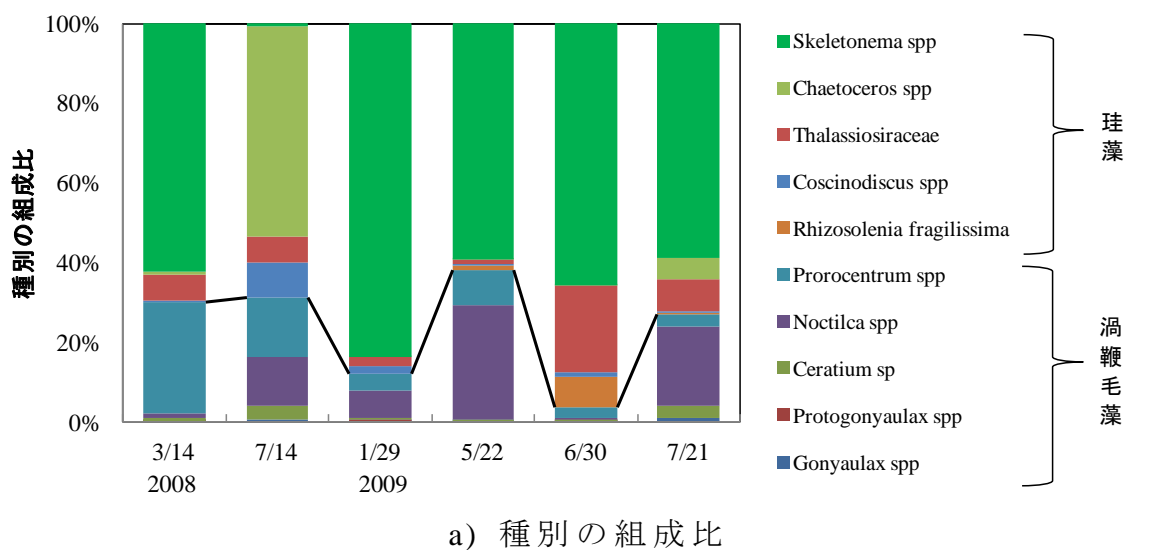


図 2.23 運河内の浮遊性藻類種ごとの組成比と細胞密度の経月変化

また、DIN/DIP と Chl.*a* の季節変動を図 2.24 に示す．なお、DIP の値が検出限界値の場合および DIN/DIP 比が 200 以上になった場合は DIN/DIP 比の値を 200 とした．DIN/DIP 比と Chl.*a* の経月変化の推移が類似していることから *S.costatum* の増殖に関係していると考えられる．*S.costatum* は大阪湾の中でも DIN/DIP 比が 100 以上の水域に出現しやすいことが指摘されており(堀ら, 1998), 今回の結果と概ね一致している．また, *S.costatum* の最適増殖条件(水温, 塩分)の場合における DIN/DIP 比と表層 Chl.*a* の関係(2008 年 3 月～2009 年 7 月)(図 2.25)において, 正の相関( $R=0.66$ )を示し有意な差がみられた( $t$ -Test :  $p < 0.05$ ).

図 2.26 にレッドフィールド比 (Redfield, 1963) と運河内表底層の DIN/DIP 比 (2008 年 3 月～2009 年 7 月) を示す。表層においては、年間を通して植物プランクトンの活発な摂取により、窒素に比べリンが少ない状態であることがわかる。一方前述したとおり、底層においては、底質からのリン溶出の影響により、過剰なリンが存在していることがわかった。

以上の結果から、本運河の水温・塩分・栄養塩濃度などの環境条件が *S.costatum* の増殖に適しており、年間を通して *S.costatum* が優占種として存在し、水中の透明度低下を招いていることが明らかとなった。このように尼崎運河内の生物種数は干潟や浅場の存在する一般海域と比較して少なく、生物多様性の劣化が進んでいることが明らかとなった。

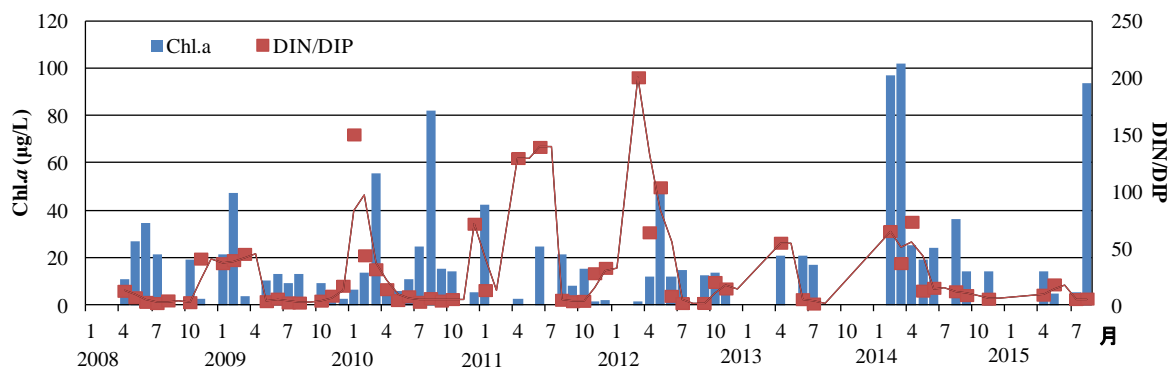


図 2.24 DIN/DIP 比と表層 Chl.a の経月変化

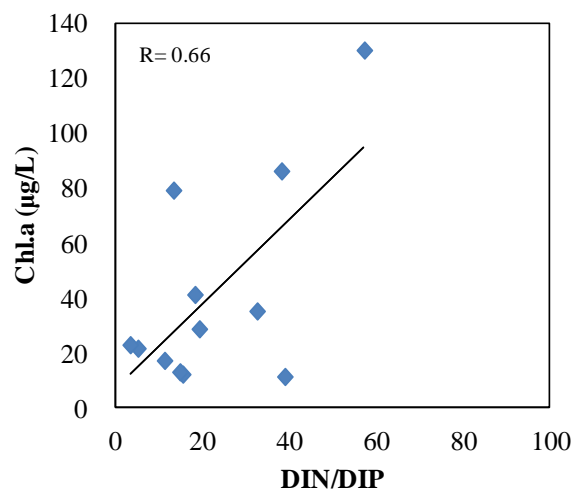


図 2.25 DIN/DIP 比と表層 Chl.a の関係

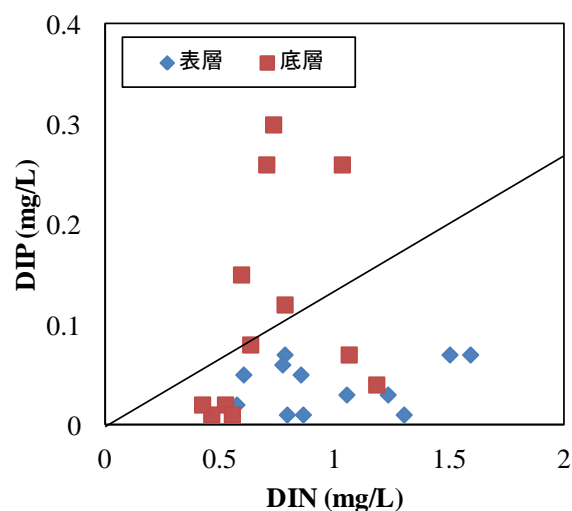


図 2.26 レッドフィールド比(直線)と表底層の DIN と DIP  
(2008 年 3 月～2009 年 7 月)

### 2.3.3 懸濁粒子の沈降による酸素消費量

尼崎運河内(St.A)において，水面の光量子が 10%，50%，90%減少した 3 水深の季節ごとの一次生産量(純生産量，呼吸量)を図 2.27 に示す．ここでは，水面の光量子が 10%減：表層，50%減：中層，90%減を底層と表記する．なお，春期における中層は測定できていないため，N.D としている．春期から夏期にかけ表層での純生産量は  $20\text{gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$  であり，呼吸量を大幅に超えた高い生産量を示した．秋期には純生産量が呼吸量を下回り，低下したものの，冬期には再び  $14\text{gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$  の純生産量を示した．これは，図 2.28 より三好ら(2007)が夏期の尼崎港で測定した結果を上回っており，尼崎運河内における一次生産量の高さがわかる．また，他の海域と異なり，冬季において純生産量が高いことも本運河の特徴であるといえる．

夏期(8 月)と冬期(12 月)における海水と懸濁物，沈降物，堆積物の  $1\text{m}^2$  当たりの酸素消費量を表 2.4 に示す．なお，夏期(8 月)における沈降物，堆積物の酸素消費量の値は，三好ら(2007)が尼崎港内にて測定した結果を参考値として用いる．夏期は冬期と比較し，海水と懸濁物で約 5.3 倍の酸素消費量が増大する結果となった．2.3.1 項で示した通り，夏期は日射量および水温の上昇に伴い，植物プランクトンの増殖と，それらを捕食する動物プランクトンの活性が高まることに起因した酸素消

費量の増加が考えられる．同様に，堆積物においては，夏期と冬期で約 7.2 倍の差がみられた．

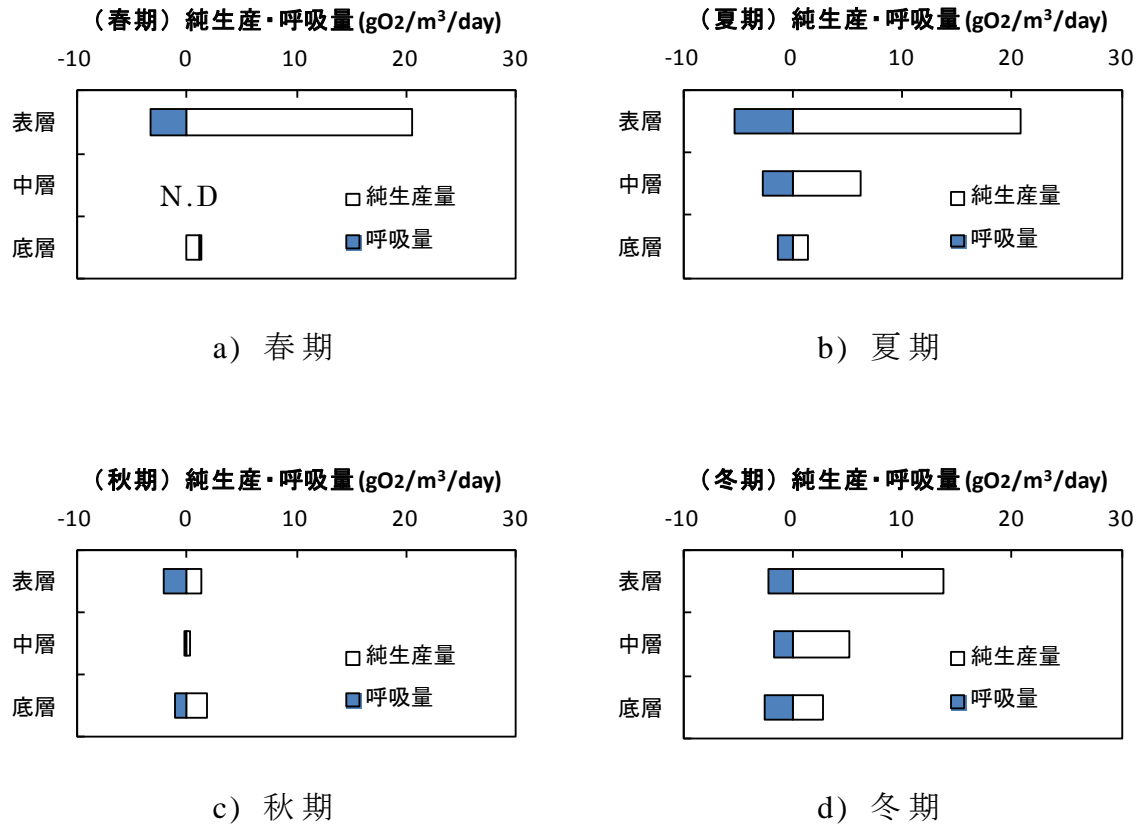


図 2.27 St.A における一次生産量の季節変動

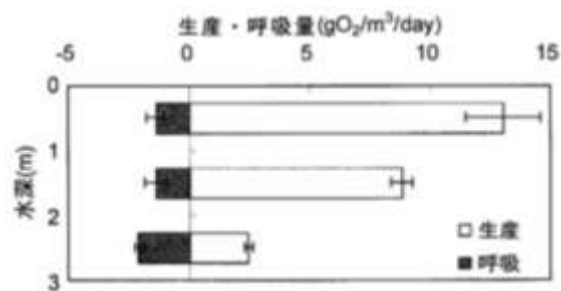


図 2.28 夏期における尼崎港での一次生産量(三好ら，2007)



表 2.4 8 月と 12 月における懸濁粒子の沈降による酸素消費量  
(※)沈降物および堆積物は三好ら(2007)が尼崎港内にて測定した結果を記載

	8月	12月
海水＋懸濁物	3.83	0.72
沈降物	0.97 (※)	1.51
堆積物	1.93 (※)	0.26

(単位: gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day)

#### 2.3.4 底質による酸素消費量および栄養塩溶出量

酸素消費量測定時の運河内鉛直水質データを図 2.29 に示す．運河内水深 3m 以深では DO<0.5mg/L，ORP<−50mV であり貧酸素かつ還元的状態となっていることがわかる．測定時の底層直上水における Free-H<sub>2</sub>S を測定した結果，3.0ppb を示し，硫化水素の発生も確認できた．酸素消費量測定時のチャンバー内および海水のみの DO の時間変化を図 2.30 に示す．測定開始後 1 時間は急速に DO が減少し，その後は緩やかな減少となっている．一方で，海水のみの DO はほとんど変化していないことから，海水のみの酸素消費量は底質に比べ微小であることがわかる．星加ら(1989)の方法に従い，実験開始時と終了時の DO 差から酸素量を求めた結果，運河内の酸素消費量は 1.97gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day と算出された．遠藤ら(2008)が大阪湾堺泉北港堺 2 区北泊地で行った測定結果から同様の方法で試算した場合，2.54gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day となり同等の酸素消費量であることがわかった．しかしながら，図 2.30 よりチャンバー内の DO は一定速度で減少せず，時間経過により変化することが考えられる．そこで，酸素消費速度を評価するために，水中の DO 消費フラックスを検討する必要がある．遠藤ら(2008)の算出方法に従い式(2.1)により求めた．

$$\Delta DO Flux = \frac{V}{A} \cdot \left( \frac{\delta DO_c}{\delta t} - \frac{\delta DO_w}{\delta t} \right) = -K \quad (2.1)$$

ここでは， $K$ ：測定間隔毎の酸素消費フラックス(mgO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day)， $DO_c$ ：チャンバー内の DO (mgO<sub>2</sub>/L)， $DO_w$ ：海水のみ DO (mgO<sub>2</sub>/L)， $t$ ：測定時間(day)， $V$ ：チャンバーの容積(L)， $A$ ：チャンバーの底面積(m<sup>2</sup>)である．図 2.31 に酸素消費フラックス  $K$  の時間変化を示す．底層が貧酸素

化している夏期では、測定開始直後からフラックスは大きく、時間経過とともに緩やかに減少することが明らかとなった。遠藤ら(2008)は大阪湾堺泉北港堺2区北泊地で貧酸素化時期から貧酸素化が解消される期間において同実験を行っており、底層 DO より高い DO の海水がチャンバー内に供給された場合、底質の酸素消費速度は底層 DO に依存する消費形態を有することが示されている。運河内での測定は、貧酸素化が顕著な夏期底層にて行ったものであり、遠藤ら(2008)が夏期の貧酸素化した時期に測定した結果と傾向が一致していることから、夏期の酸素消費量  $1.97\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  は妥当な数値といえる。しかしながら、運河内の年間の酸素消費量を求めるには、底層 DO を踏まえた試算が必要であることから今後の課題といえる。尼崎運河は淡水の事業所排水が流入するため、塩分躍層が形成され表層と底層の海水混合が抑制され、底層は DO が豊富な表層からの酸素供給を受けることができていない。底層水、底泥は還元状態になり嫌気分解が促進されている。これに伴い、硫酸イオンは還元され、硫化水素や硫化物が生成され、リンが間隙水中に遊離しやすくなり栄養塩溶出が促進されている。酸素消費の主な要因は海底に堆積した有機汚泥の生物的分解に伴うものおよび還元物質の化学的分解と推測される。

次に、底質からの栄養塩溶出実験の結果を図 2.32 に示す。実験開始後よりチャンバー内の DIN および DIP は増加し、60 分後には DIN  $8.7\text{mg/L}$ 、DIP  $0.038\text{mg/L}$  増加した。DIN を 3 態窒素別に確認したところ、時間経過とともに、 $\text{NH}_4\text{-N}$  および  $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$  はともに増加が確認された。一日あたりの溶出量としては、DIN は  $243.2\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 、DIP は  $151.0\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$  であった。この数値は白柳ら(1991)がヘドロの堆積した横浜港の底質を用いた室内実験にて測定した結果の約 10 倍の溶出量であった。チャンバー法による現地測定は底泥の巻き上げなどにより、室内実験より高い数値が測定されることがあり、今回の結果は参考値としてとらえるのが妥当であると考えられる。しかしながら、底質から栄養塩溶出量が膨大であることは疑いの余地はなく、汚濁負荷源として影響していることは明らかである。また、栄養塩の増加に伴い、DO 減少していたことから、水中の酸素は硝化による化学的な消費に使用されたと推測される。

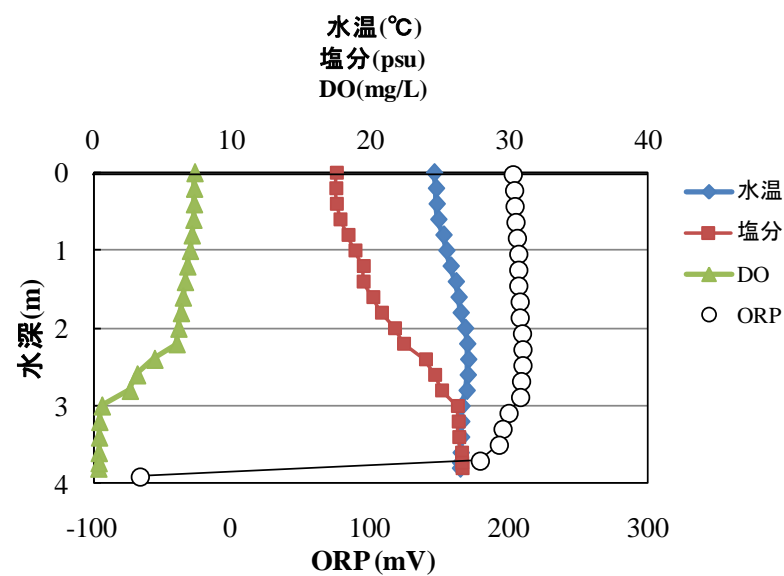


図 2.29 実験時の運河内鉛直水質データ

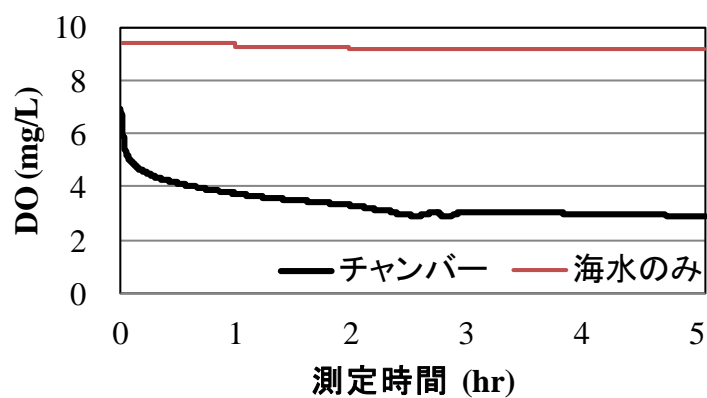


図 2.30 チャンバー内 DO の時間変化

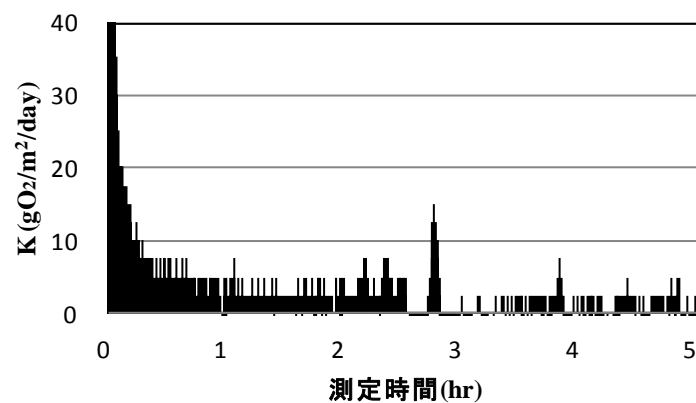


図 2.31 酸素消費フラックス  $K$  の時間変化

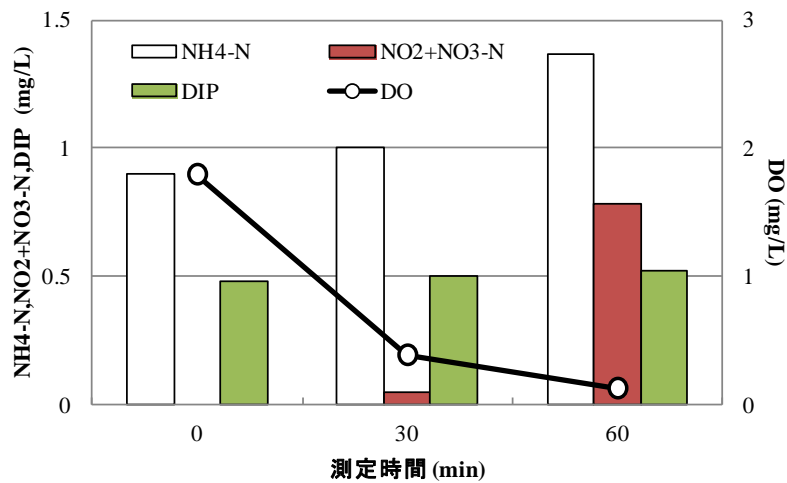


図 2.32 チャンバー内栄養塩および DO の経時変化

## 2.4 結言

本章では，尼崎運河内の水質特性と汚濁化の要因を外部負荷，内部負荷，内部生産の観点から明らかにした．また，本運河から得られる「生態系サービス」に関わる水質特性を抽出し，「生態系サービス」を享受するために必要な水質改善の目標や手法を明らかにした．以下に本研究により明らかになったことを示す．

- 1) 水面下-3.0m の密度流として，尼崎港から尼崎運河に流入する水塊の塩分は冬期の方が夏期に比べて高塩分水塊が流入しやすい状況となっていた．エスチュアリー循環の強さは，尼崎運河では水面下-0.5m では 11 月に最大となり，水面下-3.0m では 8 月が最も強くなることがわかった．尼崎運河の塩分の主たる規定要因としては，事業所からの排水，尼崎港の塩分構造と潮位の季節変化が挙げられる．
- 2) 本運河における一次生産量を測定した結果， $0.45 \sim 7.89 \text{ gC/m}^2/\text{day}$  の値であった．大阪湾の一次生産量は  $0.44 \sim 2.29 \text{ gC/m}^2/\text{day}$  (日本水産資源保護協会，2002) であり，本運河における一次生産量は大阪湾と比較して約 3.0 倍と非常に高いことがわかった．

- 3) 本運河の直立護岸壁面にはコウロエンカワヒバリガイが優占種として生息していることがわかった．生物種数は干潟や浅場がある一般海域と比較して少なく，生物多様性の劣化が明らかとなった．
- 4) 透明度の低下は，植物プランクトンの増殖に起因しており，水温・塩分・栄養塩濃度などの環境条件が *S.costatum* の増殖に適していることが明らかとなった．
- 5) 春期から夏期にかけ表層での純生産量は  $20\text{gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$  であり，呼吸量を大幅に超えた高い生産量を示した．秋期には純生産量が呼吸量を下回り，低下したものの，冬期には再び  $14\text{gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$  の純生産量を示した．夏期の尼崎港で測定された結果を上回っており，尼崎運河内における一次生産量の高さがわかる．また，他の海域と異なり，冬季において純生産量が高いことも本運河の特徴であることがわかった．
- 6) 運河内 DO 消費フラックスは  $1.97\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  と算出された．遠藤ら (2008)が行った大阪湾大和川河口域堺泉北港北泊地での測定結果は  $2.54\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  であり，同等の酸素消費が確認された．

尼崎運河内は一次生産機能や栄養塩循環などの生態系サービスを有していることが明らかとなった．しかしながら，親水性を低下させる要因となる透明度の低下は，閉鎖的な海域に過剰な栄養塩の流入，それにより植物プランクトンによる高い一次生産に起因していることがわかった．この植物プランクトンは有機物生産と溶存酸素を一次生産により生成するが，植物プランクトンが枯死し，有機懸濁物となり海底へと沈降・堆積し，いくつかの過程を経て最終的には溶存態無機窒素・リンに分解される．この分解過程において溶存酸素が大量に消費され，底層は深刻な貧酸素状態であることがわかった．汚濁機構はいくつもの要因が重なり発生していることが明らかとなったので，詳細なメカニズムを把握するためには，数値シミュレーションによる検証が必要であり今後の課題であるといえる．また，このような水環境を改善するための手法として，陸域から運河内へ流入する栄養塩を陸域へ送る新しい循環を生み出す技術が必要と考えられる．

## ＜参考文献＞

- 上嶋英機，中西敬(2005)：閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化－環境修復技術のベストミックスによる物質循環構造の修復－，環境技報，第 34 巻，5 号，pp.2-6.
- 遠藤徹，水田圭亮，重松孝昌(2008)：貧酸素化した港湾海域における底質の酸素消費特性に関する研究，海岸工学論文集，第 55 巻，pp1066-1070.
- 遠藤徹，重松孝昌(2009)：港湾海域における底質の酸素消費特性の期節変化に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vo.B2-65，No.1，pp.1051-1055.
- 大島詔，西尾孝之，藤原康博，新矢将尚，北野雅昭(2009)：夢洲周辺海域における赤潮形成珪藻 *Skeletonema costatum* および *Thalassiosira spp.* の動態，平成 20 年度大阪市立環科研報告，第 71 集，pp.49-55.
- 気象庁(1999)：海洋観測指針(第 1 部)，pp.168-169.
- 木村妙子，角田出，黒倉寿(1995)：淡水および汽水域に生息するイガイ科カワヒバリガイ属の塩分耐性と浸透圧調節，日本海水学会誌，第 49 巻，第 3 号，pp.149-152.
- 木元克則，中嶋純子，盛岡泰啓(1987)：西水研研報，第 64 号，pp.35-46.
- 黒木敏郎(1982)：海洋環境測定，恒星社厚生閣，pp.226-231.
- 城久(1983)：大阪湾底泥中に含まれるリンの存在形態と溶出分画，日本水産学会誌，Vol.47，No.3，pp.447-454.
- 白柳康夫，大矢正代(1991)：横浜港底質からのリン，窒素の溶出－溶存酸素濃度と温度の影響－，横浜市公害研究所報第 15 号，pp.57-66.
- 管原庄吾，塚本達也，鮎川和泰，木元克則，千賀有希子，奥村稔，清家泰(2010)：砂泥堆積物中溶存硫化物の簡便な現場抽出/吸光光度定量及びその有明海北東部堆積物への適用，分析化学，Vol.59，pp.1155-1161.
- 多田邦尚，一見和彦(2009)：浅海域海底の微細藻類の活性と底泥からの栄養塩溶出，沿岸海洋研究，第 47 巻，第 1 号，pp.29-37.
- 日本水産資源保護協会(2002)：大阪湾の海域環境と生物生産，水産研究業書，pp.35-37.
- 兵庫県(2007)：第 3 回尼崎シーブルー事業計画技術検討会資料，第 6，20p.
- 星加章，谷本照巳，川名吉一郎(1989)：燧灘海域の底層環境における酸素消費速度，水質汚濁研究，第 12 巻，第 7 号，pp.423-430.

- 真鍋武彦(1979): 植物プランクトンによる浄化, 「水域の自浄作用と浄化」(日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, pp96-110.
- 三浦心, 堀田哲夫, 根岸均, 鶴田泰士(2009): 都市河川汽水域における青潮の発生機構に関する調査と解析, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1453-1458.
- 三好順也, 山崎宗広, 石垣衛, 小野健, 上嶋英機(2007): 大阪湾奥部の貧酸素化に及ぼす物質循環の影響と環境改善策の一提案, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.770-774.
- 三好真千, 上月康則, 三好順也, 山口佳奈子, 宮地由紀, 村上仁士(2007): 大阪湾湾奥でのワカメ育成とその循環的利用に関する実験, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.949-954.
- 三好真千(2008): 過栄養海域構造物壁面に付着する動植物バイオマスの回収・利用に関する研究, 徳島大学大学院博士論文, 74p.
- 宗景志浩, 木村晴保(1990): 差込み現象が浦の内湾の海洋環境に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 37 巻, pp.779-783.
- 森紗綾香(2010): 尼崎運河における地域協働型の水環境改善システムに関する研究, 徳島大学大学院博士論文, 90p.
- 門谷茂, 小濱剛, 徳永保範, 山田真知子(1998): 富栄養化した水域の生物学的環境修復ー北九州市洞海湾を例としてー濾過食性二枚貝の生態特性を利用した海洋環境修復技術の開発, 環境科学会誌, 11 巻, 4 号, pp.407-420.
- 山田真知子, 武居薫, 鶴田新生(1982): 数種海産植物プランクトンの増殖に及ぼす染料排水などの影響, 日水誌, 48 巻, pp.1453-1456.
- 矢持進(1993): 大阪湾, 「水域の窒素, リン比と水産生物」(吉田陽一編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.84-95.
- 吉田陽一, 山本圭吾, 中嶋昌紀, 辻野耕実, 小玉一哉, 酒井康彦(2000): 大阪湾北東域における *Skeletonema costatum* の高密度発生と水質, 気象要因などとの関係, 日本水産学会誌, No.66, Vol.2, pp.200-206.
- APHA, AWWA, WPCF(1999): Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edition, American Public Health Association, Washington D.C., USA, pp.277-299.
- Garrels & Christ(1965): Solution, Minerals, and Equilibria. Harper & Row, Nerw York and John Weatherhill, 217p.
- John H, Ryther(1956): The Measurement of Primary Production, Limnol.

Oceanogr, 1, pp.72-84.

Kent M L, Whyte J N C, LaTrace C. (1995) : Gill lesions and mortality in seawater penreared Atlantic salmon *Salmo salar* associated with a dense bloom of *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira* species, Diseases of Aquatic Organisms, Vol.22, pp.77-81.

Redfield A.C.,B.H.Ketchum and F.A.Richards(1963) : The influence of organisms on the composition of sea-water.In:The Sea vol.2,edited by M.N.Hill,Inter Science,New York,pp.26-77.



## 第 3 章 尼崎運河水質浄化施設の機能評価

### 3.1 緒言

第 2 章で示したように尼崎運河のような水域では、微生物の有機物分解・無機化により窒素・リンが無機態で残存し、それらが植物プランクトンにより吸収され有機物に合成される。つまり、このプロセスは微生物による有機物と無機物の間での循環に過ぎないため、外部負荷や内部負荷により負荷された栄養塩を何らかの方法で系外へ除去するプロセスが必要である。実際に水中から生物により直接的に窒素・リンを除去する技術については様々な研究が行われている。門谷ら(1998)は福岡県洞海湾でその海域の優占種である付着性二枚貝のムラサキイガイ(*Mytilus galloprovincialis*)を用いた懸濁物除去による環境修復を行っている。三好ら(2007)は大阪湾湾奥の尼崎港内でワカメを生育し、回収後に堆肥化することでの海から陸への物質循環量を計測している。藻類などの一次生産機能を利用し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礫間接触浄化法(小田ら, 1992, 毛利ら, 1993)、J.C.Goldman *et al.*(1974)は、海水産植物プランクトンを下水の 2 次処理水で培養し、これをカキ養殖に利用するプロセスにより、栄養塩除去を行う実験など、これまでに数多く研究されている。しかしながら、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。この理由として、運河のような閉鎖的な場所では外部負荷の影響だけでなく悪化した底質からの内部負荷による影響も大きく、負荷量が膨大でありすべて除去することは非常に困難であるためと考えられる。そこで、グリーンインフラとしてのハード整備による効果と順応的管理によるソフト整備により、水質汚濁の改善と持続可能な社会の構築を試みた(図 3.1)。

本章では、生物による物質循環機能と市民協働活動を組み合わせた尼崎運河水質浄化施設(グリーンインフラ)の水質浄化機能における浄化量を定量的に算出し、新たに得られるようになった「生態系サービス」の観点から考察を行う。さらに、社会創生機能として市民協働活動による水質浄化効果向上のための順応的管理の提案および企業参画

の可能性について考察する．期待される効果については表 3.1 に示す．

表 3.1 尼崎運河水質浄化施設の期待する効果

機 能	懸濁物除去 水槽	栄養塩回収 水路	人工干潟	市民協働
水質浄化	・懸濁物固定， 沈降	・栄養塩固定 ・貧酸素解消	・生物生息場 の創出 ・栄養塩固定	・生物回収
社会創生	・環境学習 ・生物観察	・環境学習 ・生物観察	・生物観察 ・ヨシ狩り	・堆肥づくり

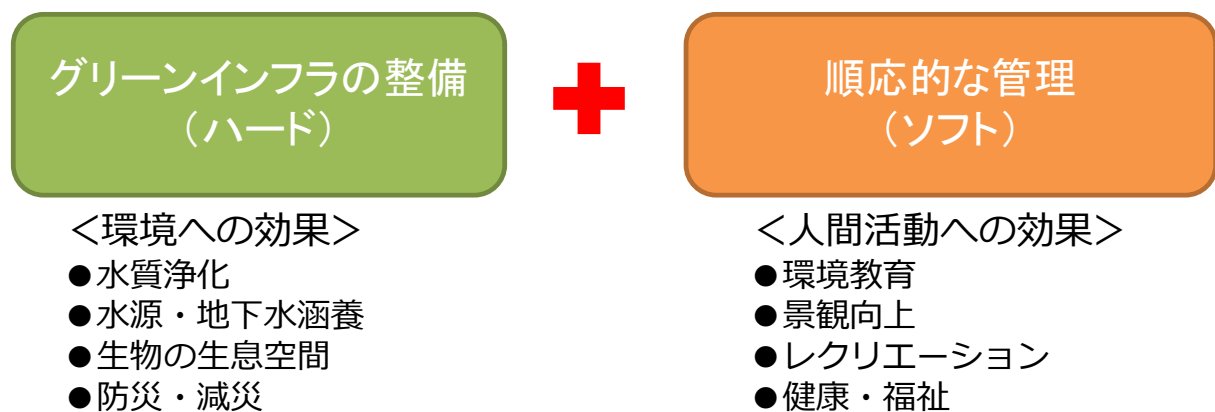


図 3.1 グリーンインフラの整備と順応的な管理

## 3.2 水質浄化機能

### 3.2.1 施設概要と現地調査方法

水質浄化施設(写真 3.1)は尼崎運河北堀地区のボードウォーク横に付帯型で建設され，面積  $268.3\text{m}^2$ (南北 7.6m，東西 35.3m)の施設である．本施設は①懸濁物除去水槽および曝気水槽，②栄養塩回収水路，③人工干潟の 3 つのエリアに分かれており，運河内から汲み上げた海水が各々の施設を通過する過程で水質浄化が成される仕組みとなっている．浄化量の算定方法については，各施設ごとに後述するが，主として図 3.2 に示す地点において採水を行い，その結果を用いている．



写真 3.1 水質浄化施設

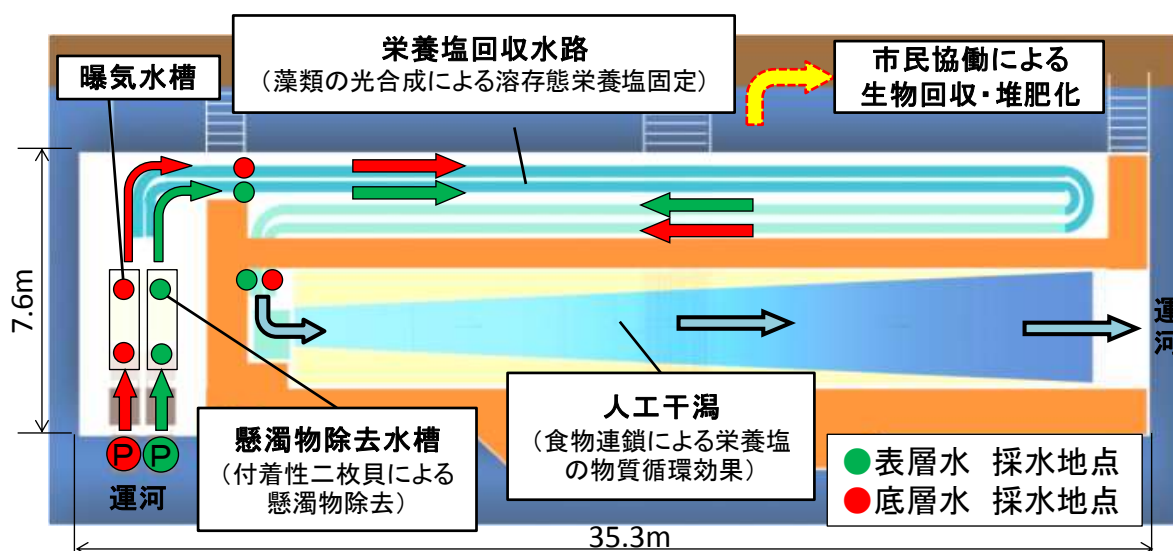


図 3.2 水質浄化施設の構造と採水地点

### (1) 懸濁物除去水槽および曝気水槽

懸濁物除去水槽および曝気水槽の概要を表 3.2 に示す。懸濁物除去水槽には、尼崎運河の優占付着生物であるコウロエンカワヒバリガイ (*Xenostrobus securis*) が付着した基盤が垂下されている(写真 3.2)。コウロエンカワヒバリガイの摂食、同化、代謝といった生体機能を利用して懸濁物質(以下、SS)を除去している。し尿として排泄された溶存態栄養塩は、懸濁物除去水槽から流出して、栄養塩回収水路において藻類に固定される。糞や偽糞として排泄された SS は、他の SS と共に水槽

内で沈降する．曝気水槽でも曝気効果に加えて，SSを沈降させる効果を有している．そこで，懸濁物除去水槽および曝気水槽の浄化能を流入出水の水質変化により評価した．

表 3.2 懸濁物除去水槽および曝気水槽の概要

項 目	懸濁物除去水槽	曝気水槽
幅×奥行き×深さ(m)	1.0×1.8×1.0	1.0×1.8×1.0
流量(L/min)	20	20
滞留時間(min)	90	90
取水水深(m)	管理水位-1.0	海底+1.0
付着基盤投入量 (wetkg)	24.0	無



二枚貝付着基盤

写真 3.2 懸濁物除去水槽(右側)および曝気水槽(左側)

2013年9月25日14時および9月26日2時の2回、各々の水槽の流入出水を採取し昼夜を考慮した．採取した海水のPON，DN，PP，DPを測定し，栄養塩固定速度を式(3.1)~式(3.3)より算出した．

$$P_{day} = (S_{in} - S_{out}) \cdot Q \cdot 60 \cdot TS \quad (3.1)$$

$$P_{night} = (S_{in} - S_{out}) \cdot Q \cdot 60 \cdot (24 - TS) \quad (3.2)$$

$$P_{day} = P_{day} + P_{night} \quad (3.3)$$

ここで、 $P_{day}$ ：昼間の栄養塩固定量(mg)， $P_{night}$ ：夜間の栄養塩固定量(mg)， $P$ ：1日の栄養塩固定速度(mg/day)， $S_{in}$ ：流入水の栄養塩(mg/L)， $S_{out}$ ：流出水の栄養塩(mg/L)， $Q$ ：流量(25 L/min)， $TS$ ：日照時間(hr)である．日照時間は，気象庁のホームページにて公開されている大阪のものを用いた．

## (2) 栄養塩回収水路

栄養塩回収水路(以下，水路)の概要を表 3.3，写真 3.3 に示す．懸濁物除去水槽および曝気水槽から流出した海水は，水路内を自然流下しながら押し出し流れ式に流出し，混合水槽で表層水と底層水が混合され人工干潟に流入する．水路に流入した海水に含有する溶存態栄養塩を水路内に自然繁茂した藻類の光合成により固定させる．同時に貧酸素化した海水に酸素を供給する役割を有する．本節では，水路の水質浄化能を流入出水の水質変化から評価した．

表 3.3 栄養塩回収水路の概要

項 目	表層系	底層系
取水水深(m)	水面上 -1.0 (懸濁物除去水槽より流入)	海底上 +0.5 (曝気水槽より流入)
総延長(m)	60	60
幅(m)	0.3	0.3
流量(L/min)	20	20
滞留時間(min)	144	144

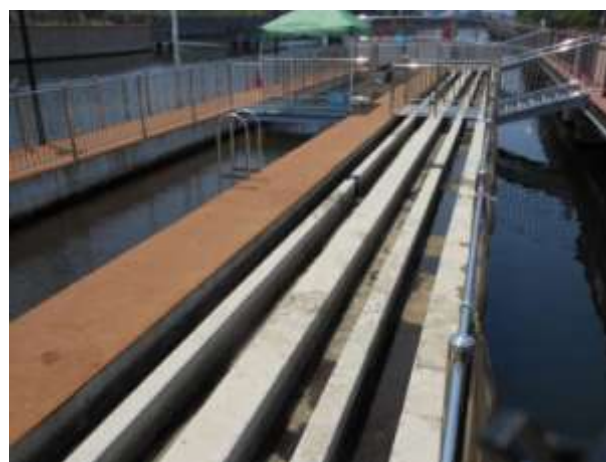


写真 3.3 栄養塩回収水路

2013 年 9 月 25 日 14 時および 9 月 26 日 2 時の 2 回、表層系水路および底層系水路の流入出水を採取し、昼夜を考慮した。採取した海水の PON, DN, PP, および DP を測定し、14 時における栄養塩固定速度を式(3.4)により算出した。

$$G_{14} = (S_{in} - S_{out}) \cdot Q \cdot 60 \quad (3.4)$$

ここで、 $G_{14}$ ：昼間の栄養塩固定速度(mg/hr)， $S_{in}$ ：流入水の栄養塩(mg/L)， $S_{out}$ ：流出水の栄養塩(mg/L)， $Q$ ：流量(25L/min)である。光量子密度の違いによる藻類の活性の影響を考慮するため、式(3.5)を用いて、感度分析により最大光合成速度を算出した。

$$G_{14} = G_m \cdot \left( \frac{I_{14}}{I_{opt}} \right) \cdot \exp \left( 1 - \frac{I_{14}}{I_{opt}} \right) \quad (3.5)$$

ここで、 $G_{14}$ ：昼間の栄養塩固定速度(mg/hr)， $G_m$ ：最大栄養塩固定速度， $I_{14}$ ：14 時における水中光量子密度( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )， $I_{opt}$ ：最適水中光量子密度( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )である。最適光量子密度は、山中ら(2012)の珪藻の実験結果を参考にし、 $400 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  に設定した。昼間の光量子密度の経時変化に伴う栄養塩固定速度を式(3.6)により算出し、式(3.7)により合算することで昼間の栄養塩固定速度とした。

$$G_i = G_m \cdot \left( \frac{I_i}{I_{opt}} \right) \cdot \exp \left( 1 - \frac{I_i}{I_{opt}} \right) \quad (3.6)$$

$$P_{day} = \sum (G_i \cdot \Delta t) \quad (3.7)$$

ここで、 $G_i$ ： $i$  時の栄養塩固定速度(mg/hr)， $G_m$ ：最大栄養塩固定速度， $I_i$ ： $i$  時の水中光量子密度( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )， $I_{opt}$ ：最適水中光量子密度( $400 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )， $P_{day}$ ：昼間の栄養塩固定量(mg)， $\Delta t$ ：微小時間(hr)である。微小時間は、1.0hr に設定した。

次に、夜間の栄養塩固定量を式(3.8)により算出した。昼間の栄養塩固定量と夜間の栄養塩固定量を式(3.9)により合算することで、一日の栄養塩固定速度とした。

$$P_{night} = (S_{in} - S_{out}) \cdot Q \cdot 60 \cdot (24 - TS) \quad (3.8)$$

$$P_{day} = P_{day} + P_{night} \quad (3.9)$$

ここで、 $P_{night}$ : 夜間の栄養塩固定量(mg),  $S_{in}$ : 流入水の栄養塩(mg/L),  $S_{out}$ : 流出水の栄養塩(mg/L),  $Q$ : 流量(25L/min),  $TS$ : 日照時間(hr)である。日照時間は、水中光量子密度が正を示した時間とした。ここで、 $P$ : 一日の栄養塩固定速度(mg/day),  $P_{day}$ : 昼間の栄養塩固定量(mg)である。

さらに、水路における水質浄化機能の向上実験として、水路における最適流速を明らかにするため、水路(表層水)の底部をコンクリートブロックで嵩上げし、通水流速を 0.9, 1.0, 1.5, 1.8cm/s(流量: 20, 25, 30, 32L/min に相当)に調整し、各流速における水路内の藻類量を測定した。各実験系は単一水路内に互いに影響を及ぼさないよう 2m の間隔で設置した。水路流速は電磁流速計(ケネック製: VP1000)で測定した。実験期間は 2013 年 7 月 29 日から 58 日間である。

### (3) 人工干潟

人工干潟の概要を表 3.4, 写真 3.4 に示す。人工干潟のねらいは、人工的に浅場を設けることで生物の生息基盤を創出し、生息生物による物質循環によって水質浄化を行うことである。水質浄化施設へ汲み上げられた海水は、懸濁物除去水槽・曝気水槽、栄養塩回収水路を経て、人工干潟上流から流入する。また、下流からは直接海水が流入する。運河から直接海水が流入するため、様々な生物が加入することが期待されている。しかしながら、一色ら(2013)により、生息生物は単調であり、物質循環が停滞し底質悪化が発生していたという課題が明らかにされている。上流では藻類由来の有機物が鉛直方向に鋤き込まれたため、下流ではコウロエンカワヒバリガイの大量発生が問題とされている。そこで、人工干潟における浄化能として、藻類の光合成および優占生物であるコウロエンカワヒバリガイの代謝より評価した。

表 3.4 人工干潟の概要

幅×長さ(m)	3×27.5
地盤高(m)	DL+0.4～DL+0.7
勾配	1/100 程度
底質厚(m)	0.3
底質	砂質





写真 3.4 人工干潟

2013 年 9 月 25 日に，上流および下流の代表 2 地点でアクリルコア ( $\phi=45\text{mm}$ )を用いて底質を採取し，表層 15mm をスライスすることで現場培養実験に供した．実験は明条件，暗条件を同時に実施することで人工干潟底質の光合成および呼吸による栄養塩除去速度を算出している．プラスチック製円筒型容器に，プラスチックシャーレに投入した底質を設置した．また，容器内に底質が攪乱されないよう人工干潟下流より流入してきた海水 1.5L を投入し，落とし蓋を設けた．さらに，底質の光合成および呼吸による栄養塩除去速度の測定と並行して，人工干潟下流より流入してきた海水を明暗瓶法に現場培養し，光合成および呼吸による栄養塩除去速度を補正した．なお，実験時間は 2 時間とし，各地点昼間と夜間の 2 回実施した．実験前後には採水を行い，DIN および DIP を計測した．底質の光合成および呼吸による栄養塩固定速度の算出には，国分(2009)が用いた総生産速度の計算式を参考にし，式(3.10)により算出した．

$$G = \{(\Delta S_{LC} - \Delta S_{LB}) - (\Delta S_{DC} - \Delta S_{DB})\} \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{1}{t} \quad (3.10)$$

ここで， $G$ ：藻類による栄養塩固定速度( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$ )， $\Delta S_{LC}$ ：明条件培養実験による栄養塩変化量( $\text{mg}/\text{L}$ )， $\Delta S_{LB}$ ：明瓶内栄養塩変化量( $\text{mg}/\text{L}$ )， $\Delta S_{DC}$ ：暗条件培養実験による栄養塩変化量( $\text{mg}/\text{L}$ )， $\Delta S_{DB}$ ：暗瓶内栄養塩変化量( $\text{mg}/\text{L}$ )， $V$ ：円筒型プラスチック製容器に投入した海水量(1.5L)， $S$ ：底質面積( $0.0016\text{m}^2$ )， $t$ ：実験時間(2.0hr)である．また，昼間の培養



実験によって得られた総生産速度は、栄養塩回収水路と同様、光量子密度の経時変化を考慮した。夜間の培養実験によって得られた総生産速度は得られた結果を利用した。

次に、水位変化による干満の影響を考慮するため、実測水位データから冠水面積を求め、式(3.11)より  $i$  時における人工干潟全体の栄養塩固定速度を算出し、式(3.12)より各時間の栄養塩固定速度を合算し、人工干潟の一日の栄養塩固定速度を算出した。

$$P_i = G_i \cdot S_{flood} \quad (3.11)$$

$$P = \sum P_i \quad (3.12)$$

ここで、 $P_i$  :  $i$  時における栄養塩固定量(mg),  $G_i$  :  $i$  時における栄養塩固定速度(mg/m<sup>2</sup>/hr),  $S_{flood}$  : 冠水面積(m<sup>2</sup>),  $P$  : 人工干潟の栄養塩固定速度(mg/day)である。

実験終了後、コウロエンカワヒバリガイによる栄養塩固定速度を明らかにするため、人工干潟を 5 つのエリアに分割し、その代表地点の底質に付着するコウロエンカワヒバリガイをコドラート(15cm×15cm)で剥ぎ取り、生存個体の殻長を測定した。図 3.3 に示す山中ら(2013)の実験結果を参考に、式(3.13)によりコウロエンカワヒバリガイ 1 個体あたりの PON 摂餌速度を算出した。

$$C = 0.166 \cdot L + 0.23 \quad (3.13)$$

ここで、 $C$  : コウロエンカワヒバリガイ 1 個体あたりの PON 摂餌速度(μgN/hr/.ind),  $L$  : コウロエンカワヒバリガイの殻長(mm)である。

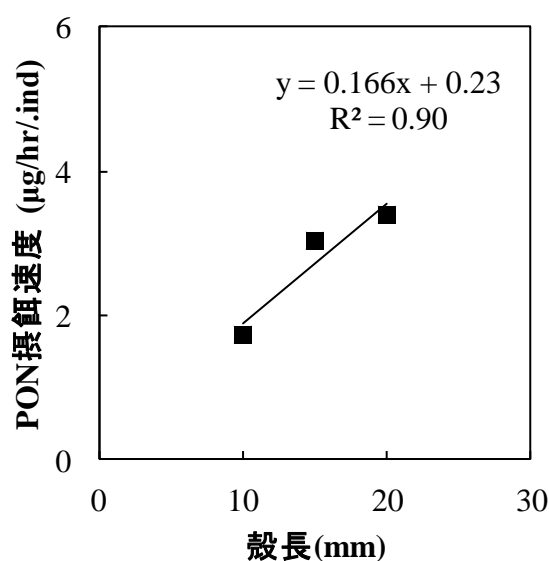


図 3.3 コウロエンカワヒバリガイによる PON 摂餌速度(水温 20℃)  
(山中ら, 2013)

各エリアに生息する全てのコウロエンカワヒバリガイによる PON 摂餌速度を式(3.14)により算出した。

$$CN = \sum \frac{C}{0.0225} \cdot S \cdot (2.4 \cdot 10^{-5}) \quad (3.14)$$

ここで,  $CN$ : 各エリアに生息するコウロエンカワヒバリガイによる PON 摂餌速度(gN/day),  $C$ : コウロエンカワヒバリガイ 1 個体あたりの PON 摂餌速度(µgN/hr),  $S$ : 各エリアの面積(m<sup>2</sup>)である。

また, 各エリアに生息する全てのコウロエンカワヒバリガイによる PP 摂餌速度は, 式(3.15)により算出した。なお, 窒素からリンへの変換にはレッドフィールド比(N:P=7.2:1, 重量比)(Redfield *et al*, 1963)を用いた。

$$CP = \frac{CN}{7.2} \quad (3.15)$$

ここで,  $CP$ : 各エリアに生息するコウロエンカワヒバリガイによる PP 摂餌速度(gP/day),  $CN$ : 各エリアに生息するコウロエンカワヒバリガイによる PON 摂餌速度(gN/day)である。次に, PON 摂餌速度あるい

は PP 摂餌速度から, 式(3.16), 式(3.17)を用いて, 排出速度を算出した.

$$ED=0.5166 \cdot CN \quad or \quad P \quad (3.16)$$

$$EP=0.1318 \cdot CN \quad or \quad P \quad (3.17)$$

ここで,  $ED$ : 溶存態窒素・リン排出速度(g/day),  $EP$ : 懸濁態窒素・リン排出速度(g/day),  $CN$  or  $P$ : 各エリアに生息するコウロエンカワヒバリガイによる懸濁態窒素・リン摂餌速度(g/day)である.

#### (4) 水質浄化活動

水質浄化活動により水質浄化に寄与した生物は, 役目を終えた(死亡間近)と判断された時点で人力によって系外に除去され, 陸域で堆肥材料として活用される. 栄養塩回収水路から除去した生物(藻類)を重量計測した後, 含有窒素量を分析し, 系外除去効果を定量化した(写真3.5).



写真 3.5 栄養塩回収水路からの藻類回収

### 3.2.2 結果

#### (1) 懸濁物除去水槽および曝気水槽

懸濁物除去水槽および曝気水槽の窒素収支・リン収支を図 3.4, 図 3.5 に示す. 懸濁物除去水槽の窒素固定速度は 10.08 gN/d(PON: 6.86 gN/d, DN: 3.22 gN/d), リン固定速度は 4.99 gP/d(PP: 6.97 gP/d, DP: -1.98 gP/d)であった. 曝気水槽の窒素固定速度は-1.31 gN/d(PON: 3.33 gN/d, DN:

-4.64 gN/d), リン固定速度は-0.88 gP/d(PP: -0.28 gP/d, DP: -0.60 gP/d)であった。懸濁物除去水槽は“浄化型”の水槽, 曝気水槽は“汚濁型”の水槽となっていた。曝気水槽が汚濁型となった要因として, 水槽内の酸素供給により沈降物の好気分解が進んだことによる栄養塩増加が考えられる。2012年9月の懸濁物除去水槽におけるコウロエンカワヒバリガイ 23 wetkg による PON 固定速度 3.01 gN/d であった(山中ら, 2013)。本調査時に濁り除去水槽に投入されていたコウロエンカワヒバリガイは 9.7 wet kg と 2012 年よりも少ないにも関わらず, PON 固定速度は 2012 年の 2.3 倍であった。このことから, 今回得られた PON 固定速度の大半は懸濁物質の沈降に起因するものであったと考えられる。

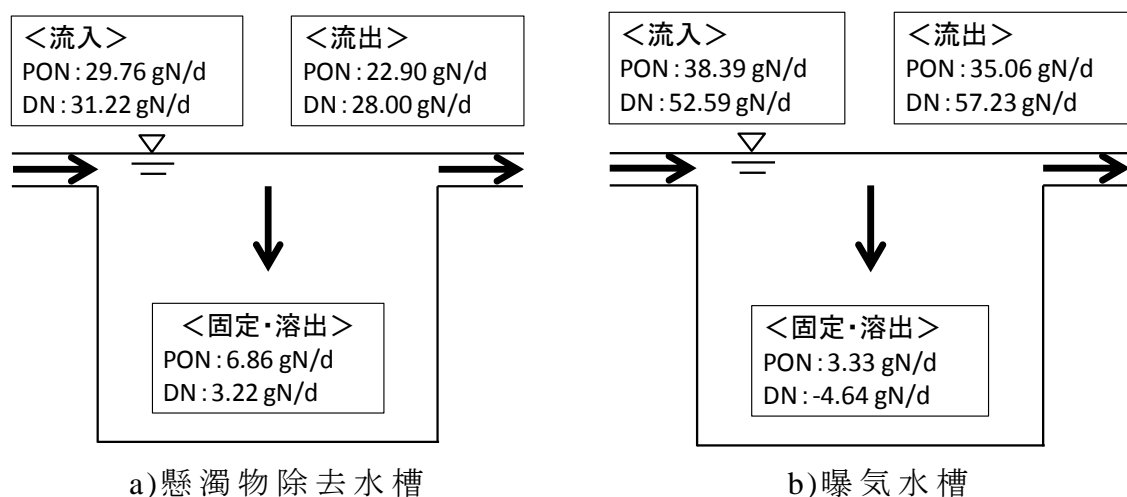


図 3.4 懸濁物除去水槽および曝気水槽の窒素収支

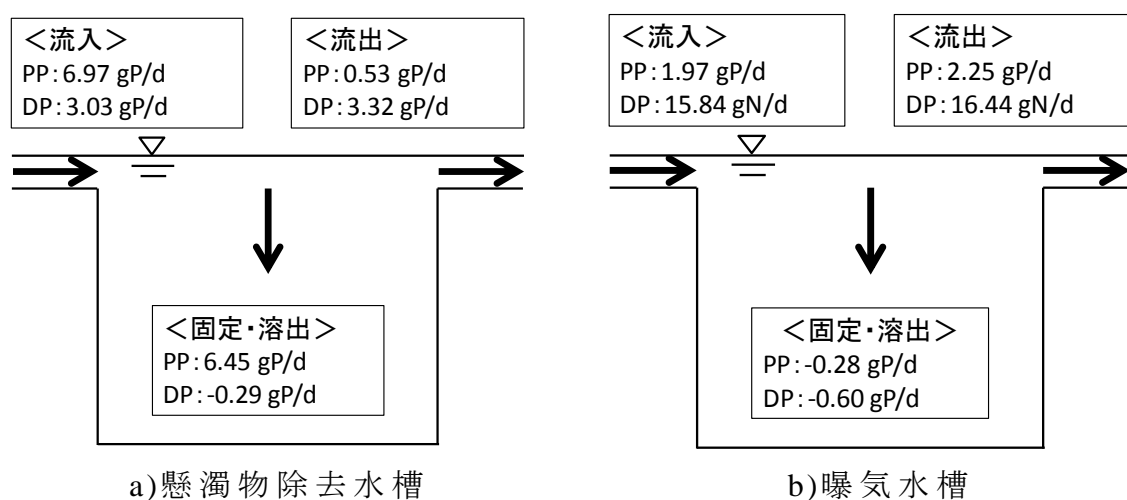


図 3.5 懸濁物除去水槽および曝気水槽のリン収支

## (2) 栄養塩回収水路

栄養塩回収水路の窒素収支・リン収支を図 3.6, 図 3.7 に示す. 表層系の窒素固定速度は 26.78 gN/d(PON : 15.14 gN/d, DN : 11.64 gN/d), リン固定速度は 2.91 gP/d(PP : 1.46 gP/d, DP : 1.45 gP/d)であった. 底層系の窒素固定速度は 12.11 gN/d(PON : 20.05 gN/d, DN : -7.94 gN/d), リン固定速度は 3.71 gP/d(PP : 4.00 gP/d, DP : -0.29 gP/d)であった. 栄養塩回収水路は, 自生した藻類による溶存態の栄養塩の固定を目指している. しかしながら, 底層系では DN, および DP が負値を示していたことから, 藻類から栄養塩が回帰していたと推測される. 藻類の光化学系 II の最大量子収率である  $F_v/F_m$ (園池, 2005)を測定したところ, 表層系では  $0.431 \pm 0.047$ , 底層系では  $0.018 \pm 0.018$  であり, 底層系の藻類がストレスを受けていたことが判明した(図 3.8). その要因として, 調査日に底層系では海水が白濁しており, 腐卵臭もしたことから, 底層系は青潮状態になっていたと考えられる. 尼崎運河では夏季において底層水が貧酸素化するため, 海底の堆積物は硫化水素を伴う嫌気分解される. 嫌気分解により生じた硫化水素が施設に汲み上げられ曝気水槽で酸化し, 青潮が発生したと考えられる. そのため, 夏季に底層系において青潮対策を検討する必要がある.

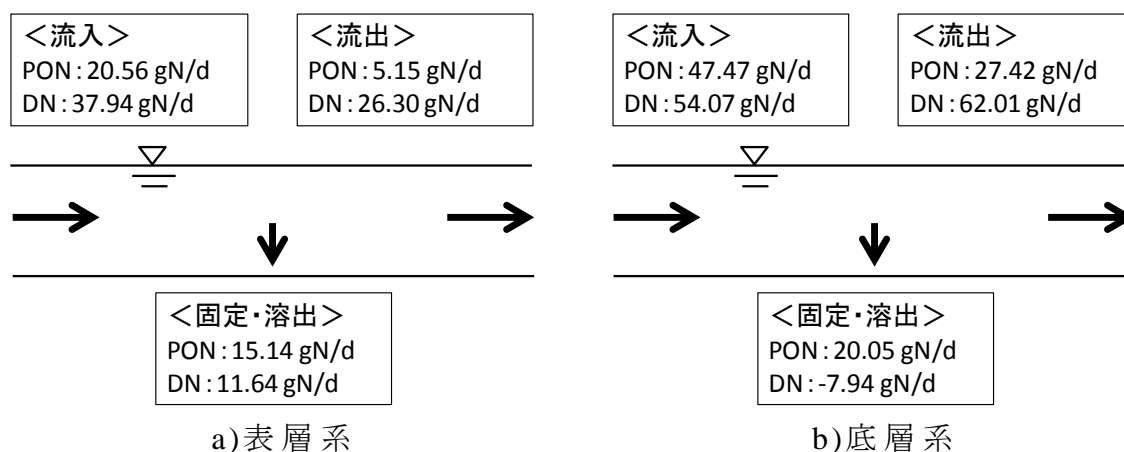


図 3.6 栄養塩回収水路の窒素収支

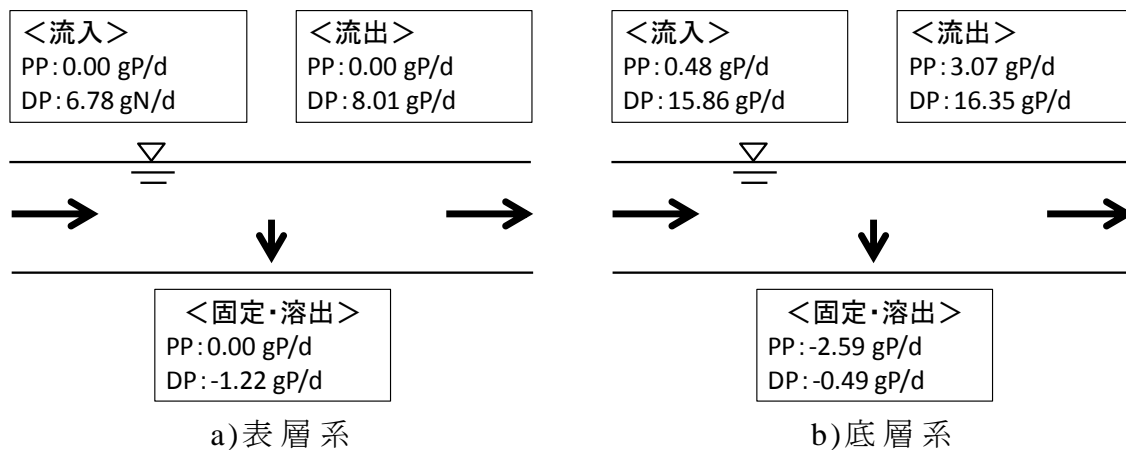


図 3.7 栄養塩回収水路のリン収支

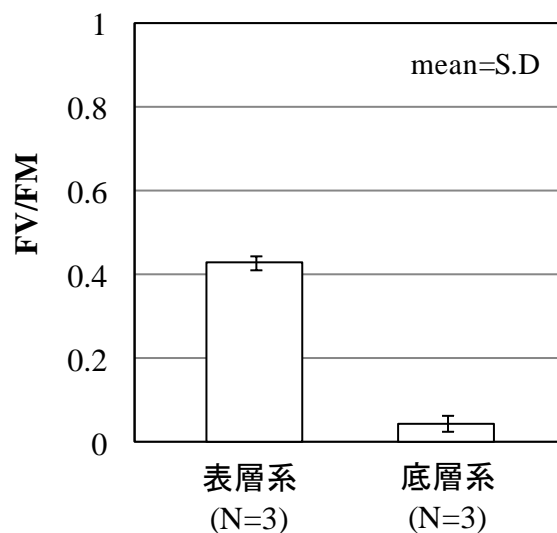


図 3.8 栄養塩回収水路に繁茂する藻類の Fv/Fm

### (3) 人工干潟

人工干潟の栄養塩循環を図 3.9 に示す. 藻類による一次生産速度およびコウロエンカワヒバリガイによる二次生産速度を合算すると, 人工干潟の窒素固定速度は 56.47 gN/d (PON: 4.89 gN/d, DN: 51.58 gN/d), リン固定速度は 0.53 gP/d (PP: 0.69 gP/d, DP: -0.16 gP/d) であった. 人工干潟内での物質循環を考えると, 藻類は春季から秋季にかけてボラの稚魚によって摂食されていたことを確認したが, コウロエンカワヒバリガイを摂食する生物は確認されていない. そのため, 冠水時間が長い人工干潟下流ではコウロエンカワヒバリガイが大量に底質に付着

していた。コウロエンカワヒバリガイは懸濁物除去に寄与するが、その死骸や排泄物などにより底質に負荷を与えていることが推測される。上流に比べ下流では底質の AVS が高く、水産用水基準で「正常泥」とされる  $0.20\text{mg/dryg}$  を上回っており底質悪化が確認された(図 3.10)。そのため、人工干潟に大量に付着するコウロエンカワヒバリガイも人の手によって陸域に取り上げることが必要であると考えられる。

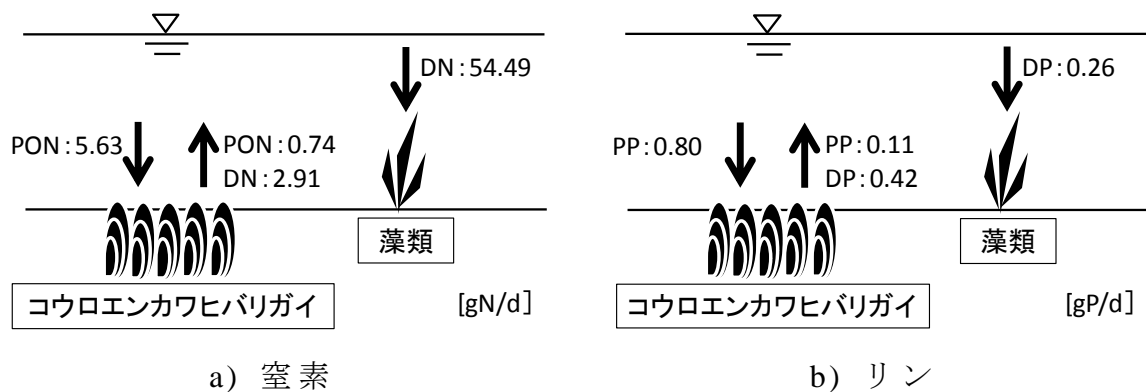


図 3.9 人工干潟の栄養塩収支

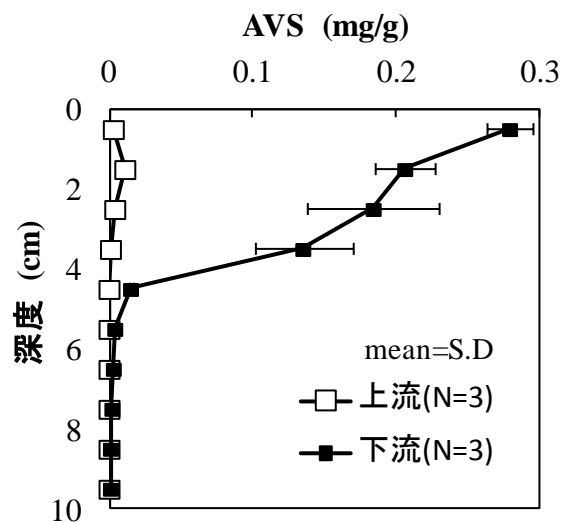


図 3.10 人工干潟の AVS(2014 年 11 月)

#### (4) 水質浄化活動

2013 年 7 月 29 日に、栄養塩回収水路内での市民協働による藻類の回

収作業が実施された。このとき回収藻類量は 26.1drykg(表層系 13.8drykg+底層系 12.3drykg)であり,含有窒素量は 270.8gN であった。これは,前回に実施した藻類回収(2013 年 3 月 20 日)から今回の回収日までの 133 日間に栄養塩回収水路内の藻類が水中から除去したと試算される窒素量 5208.3gN の 5.2%にあたる。系外除去効果の向上のためには藻類除去の頻度を上げることが考えられるが,栄養塩回収水路では付着性藻類を捕食するヨコエビ類の優占,ゴカイ類とフナムシの出現,枯死した藻類の分解やデトリタスの状態で浮上し流出する様子が観察されており,これらの複雑な生態系プロセスによる藻類量の変動を含めた検討が必要である。

### 3.2.3 考察

#### (1) 水質浄化施設全体での水質浄化効果

水質浄化施設全体の栄養塩収支を図 3.11 に示す。水質浄化施設に 151.95 gN/day(PON: 68.14 gN/day, DN: 83.81 gN/day)の窒素が流入し, 47.55 gN/day (PON: 17.60 gN/day, DN: 29.95 gN/day)の窒素が返送されていた。また, 27.82 gP/day (PP: 8.94 gP/day, DP: 18.88 gP/day)のリンが流入し, 26.31 gP/day (PP: 4.68 gP/day, DP: 21.64 gP/day)のリンが返送されていた。本結果より, このときの水質浄化施設全体の水の中からの窒素除去率は 69%, リン除去率は 5.4 %であることがわかった。下水処理施設と比較した場合, 本浄化施設の窒素除去率では高度処理施設(窒素除去率: 65~70%)(日本下水道協会, 2001)と同程度の性能であることがわかった。リンの除去量が低下した要因として, 底層系水路における枯死した藻類からの水中への回帰により除去率が低下したと考えられる。しかしながら, 定期的な藻類回収, 流入水質の管理, 繁茂する藻類種(スジアオノリなどの緑藻類)によっては流入水質に対する栄養塩除去率は窒素・リンともに 90%を超える実験結果が報告されている(山中ら, 2010)ことから, 最良な環境条件が揃えばさらなる水質改善効果が期待できると考えられる。水路内に繁茂する藻類による栄養塩固定効果を高める条件についての検討は後述する。次に各区画の窒素の水中からの除去効果(固定量)について評価する。

懸濁物除去水槽での PN 固定量は 6.86gN/day であった。この結果を山中ら(2012)の実験結果と比較すると, 1.94 倍高い値であり, その要因としてコウロエンカワヒバリガイの摂餌だけではなく懸濁物の沈降によ

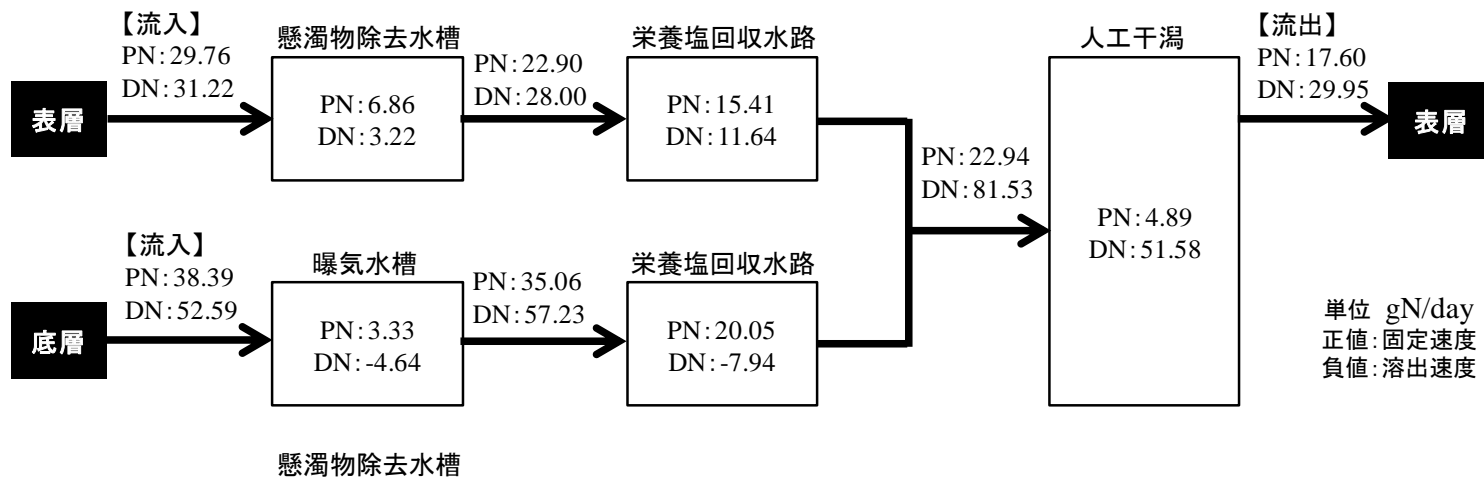


る効果が推察された。

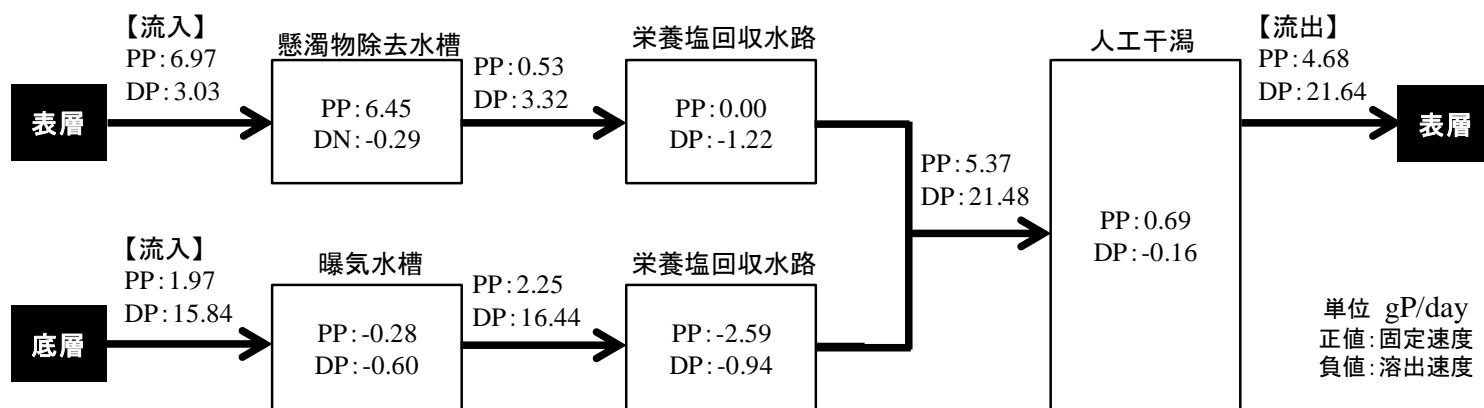
栄養塩回収水路における表層系と底層系の水質浄化量を比較した場合、底層系では昼間における藻類の一次生産による栄養塩固定量(DN固定量：0.04gN/hr)が設計値(DN固定量：0.47gN/hr)より9割程度少なかった。調査日において図3.8に示したように藻類の活性度合を表すFv/Fmが、表層系と比較し底層系で小さく、藻類の活性低下が生じていた。この原因として、調査日の底層系からの流入水は還元状態(ORP：-60mV)であり底層系の水路内では、海水が白濁し腐卵臭が発生していたことから、青潮に類する状況となっていたと推察された。図3.12に水路内に繁茂した付着性藻類のChl.a量+Pheo.量に対するChl.a量の割合を示す。表層系と比較して底層系のChl.a量の割合が少なかった。一方、浄化活動による2013年夏季の回収藻類量は表層系で13.8drykg、底層系で12.3drykgであり同程度であった。以上の結果を踏まえ、表層系と比較して底層系の浄化能が低かった原因は藻類の活性度低下であることがわかった。夏季において底層系水路では汲み上げた海水に硫化水素が含まれる可能性があり、底層系流入水の水質悪化による浄化能低下への対策が必要である。

次に、栄養塩回収水路における流速ごとの藻類量を図3.13に示す。現在の定格流速1.0cm/sから0.9cm/sに変更することにより藻類繁茂量が約37%増加することがわかった。この結果は既往の研究(Whitford,L.A, 1961, 委, 2001)と定性的に一致しており、これにより、藻類取上げ量が増加し、系外除去効果が向上されると期待できる。

人工干潟における窒素固定量は単位面積あたり34.22mgN/m<sup>2</sup>/dayであり、これは矢持ら(2003)が実施した大阪南港野鳥園湿地の結果(58~144mgN/m<sup>2</sup>/day)には及ばなかった。繁茂した微細藻類の一次生産機能により溶存態栄養塩の固定とコウロエンカワヒバリガイの摂餌活動による懸濁物除去により水質浄化効果が確認できた。一方、人工干潟では、コウロエンカワヒバリガイのマット化による底質の嫌気化が発生しており、コウロエンカワヒバリガイの密生場所では底質中のAVSが0.15mg/drygと高くなっており、他のベントス類が出現せず、生物多様性の観点からは人工干潟に加入するコウロエンカワヒバリガイは除去すべきと判断された。



a)窒素



b)リン

図 3.11 水質浄化施設全体の栄養塩収支

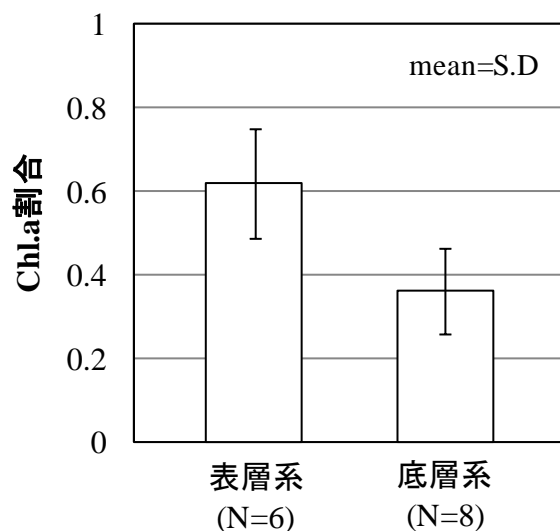


図3.12 藻類のChl.*a*量+Pheo.量に対するChl.*a*量の割合

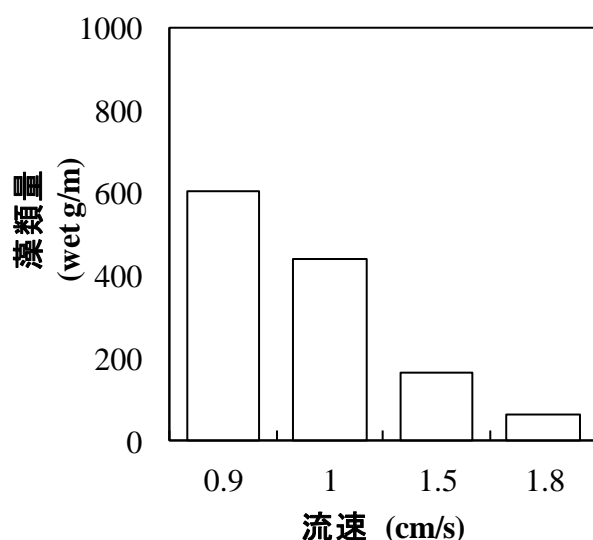


図 3.13 流速と藻類量の関係 (2013 年夏季表層系水路)

## (2) 市民協働活動による栄養塩除去量の向上

市民協働による水質浄化活動として栄養塩回収水路からの藻類回収を 2012 年 7 月～2015 年 11 月まで、計 11 回実施した。各年における窒素およびリン除去量の推移を図 3.14 に示す。なお、このときの栄養塩固定量(DIN, DIP 固定量)は、栄養塩回収水路の流入部と流出部で毎月 1 回、昼間に採水を行い、その濃度差より算出したものを用いた。2012 年と比較すると、2015 年における窒素除去量は、約 3.4 倍に増加していた。除去量が増加した要因は、人工干潟改良によって植栽したヨシの刈り取りや、水槽からの堆積物取上げといった順応的維持管理によるものであり、これが市民協働活動における栄養塩除去量向上効果であるといえる。人工干潟の順応的管理については、

### 3.3 節で論ずる。

現在、水質浄化活動は現地の藻類繁茂状況により浄化活動の実施日を決定している。そのため、培養期間や回収量が定まっていないことが懸念事項である。しかしながら、培養期間や回収量が把握できれば、より効果的な水質浄化活動ができ、栄養塩除去量向上につながると考えられる。本施設が最大限の栄養塩除去量を得るための方針について、①市民協働活動による藻類回収量向上余地、②技術的支援による改善余地の2つの観点から検討を行った。

栄養塩回収水路からの藻類の取上げについて着目し、市民協働の活性を高めることによって向上できる栄養塩循環量について試算した。

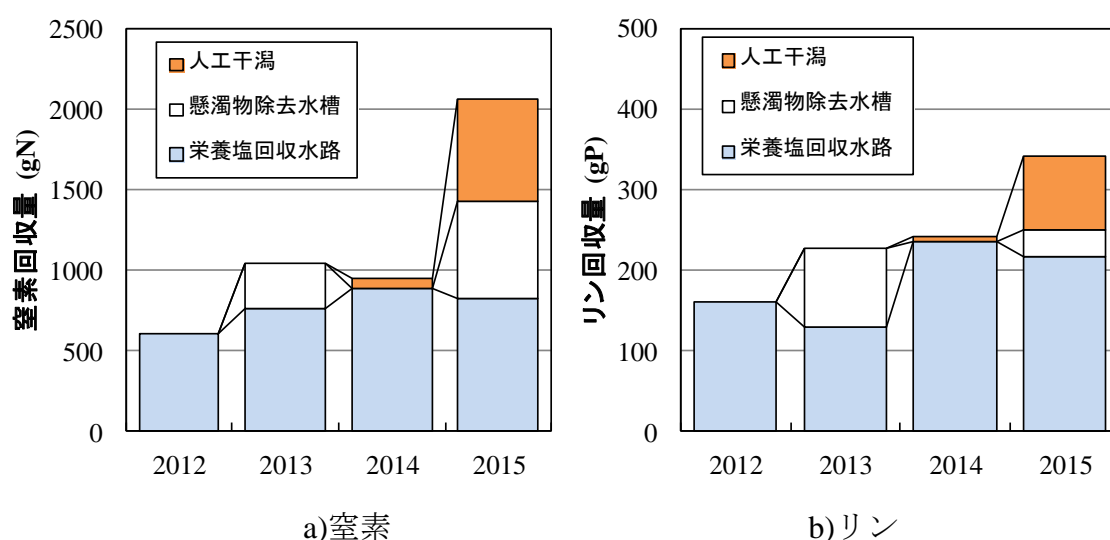


図 3.14 市民協働活動による物質循環効果

(※2014 年懸濁物除去水槽からの除去量については欠測)

#### ① 市民協働活動による藻類回収量向上の余地

栄養塩回収水路内での生産速度は、夏季に高く、冬季になるとその活性が失われる傾向が現地調査の結果から見受けられるため、対象とする取上げ期間を7～10月の4カ月間とした。この期間中に回収した藻類量と、回収実施間隔(培養期間)より、図 3.15 のような対数関数が得られた。なお、このとき浄化活動によって回収された藻類量に加えて、2015 年 7 月 28 日の浄化活動実施後、14 日後と 28 日後に 5cm×5cm コドラートを用いて水路内の藻類を剥ぎ取り、水路全体の藻類量を概算したものを用いている。概算された水路全体の藻類量は 14 日培養で 4.6drykg, 28 日培養で 5.0drykg であった。

図 3.15 から得られた近似式を用いて、その回収藻類量が最大となる回収実施回数を求めた。結果を図 3.16 に示す。この結果より、2015 年と同様の水質状況、藻類繁茂状況であったと仮定した場合、7 月～10 月に 25 回の浄化活動を実施することで、81.9 drykg の藻類と 1680.4gN の窒素が回収できると試算された。これは 2015 年の水路から回収した藻類による窒素回収量の約 2 倍に相当する。回収回数を 25 回より増加さ

せた場合、回収後の藻類の培養速度が追いつかず、結果として回収量が低下すること  
も明らかとなった。

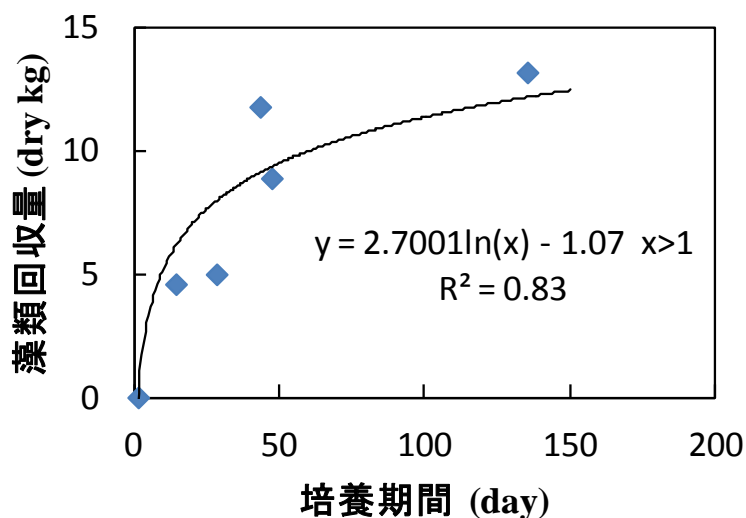


図 3.15 藻類回収量と培養期間(夏季)

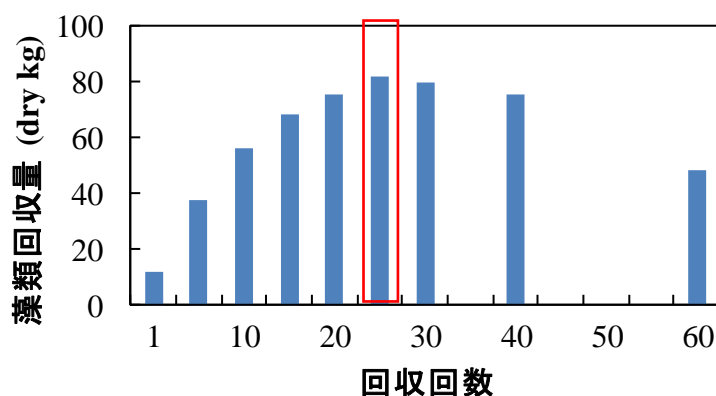


図 3.16 藻類回収量と回収回数(夏季)

## ② 技術的な改善策による向上余地

栄養塩回収水路に対する技術的な改善策を用いた場合の藻類回収量について検討した。3.2.3 項で論じたように、現在の栄養塩回収水路における定格流速を 1.0cm/s(25L/min)から 0.9cm/s(20L/min)に変更することにより藻類繁茂量が約 37%増加することが実験結果より得られているため、2015 年と同様の水質状況、藻類繁茂状況であると想定した場合、流速を変更することで、55.1drykg の藻類回収、1130.0gN の窒素回収量が見込まれた。

### (3) 尼崎運河の水環境特性との関係

水質浄化施設における水質改善効果により、運河内の水環境を改善するために必要な規模を求めた。運河全体の水量を浄化することは物理的、経済的に難しいため、本水質浄化施設の規模を考えた場合、尼崎運河内北堀運河に流入する事業所排水を環境基準以下に低減することを想定した。表 2.2 より尼崎運河に一日に流入する窒素量は  $32.9\text{kgN}(=1012\text{m}^3/\text{日} \times 32.5\text{mgN/L})$  であり、前述した水質浄化施設における窒素回収量を 3.2.3(2)項で求めた  $1680.4\text{gN}$  とした場合、 $19.6$  施設  $(=32.9\text{kgN}/1680.4\text{gN})$  を設置することで、事業所排水からの窒素負荷量を回収できる計算になる。これにより現在の水質をより悪化させない対策としての手法として考えられる。

## 3.3 社会創生機能

### 3.3.1 参与観察の概要

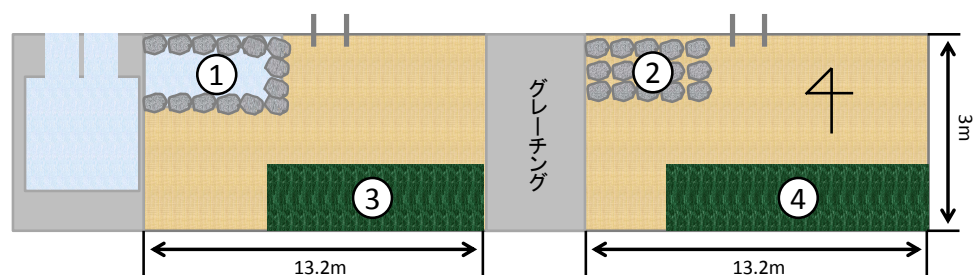
#### (1) 人工干潟の順応的管理

人工干潟における2012年から2013年までの経過観察の結果、有機物が堆積し続ける汚濁型干潟となっていることが判明したため、生態系管理を行い生物多様性向上を促進する対策を施すこととなった。2014年5,6月に市民、大学有識者、環境活動に取り組む中高生、行政、管理者による2度の市民ワーキング(参加者30名程度)を行い、人工干潟の改良実験計画を作成し(表3.5)、2014年7月に市民協働イベントとして干潟づくり活動(潮だまり、レキ浜、ヨシ原を造成)を実施した。また、2014年8月と2015年1月に干潟づくり後の出現生物種数を確認するため、コドラート(15cm×15cm)内の生物種数を測定した。また、改良後の人工干潟の様子と対策後の区画番号を図3.17へ示す。

次に、2014年8月30日の水質浄化活動に参加した中学生および高校生28名を対象に表3.6に示すアンケート内容で調査を行った。アンケートは、活動終了後に実施し、記入が終わり次第回収した。

表 3.5 2014 年度 干潟づくりの対応策

	課題	対応策
1	干潟西側での底質悪化 (有機物堆積が原因)	潮だまりの創出 (汀線での有機物堆積は天然干潟でも確認されているが、藻類が土中に鋤きこまれにくい環境を創出し、また、生物加入による浄化も期待する)
2	単純な生物生息環境	ヨシの植栽、磯場の創出
3	東側でコウロエンカワヒバリ ガイの加入抑制	ヨシの植栽 (アレロパシーによる加入抑制)



区画①潮だまり 区画②磯場区画 ③ヨシの植栽(上流側)

区画④ヨシの植栽(下流側)

図 3.17 2014 年度 干潟づくりの取り組み

表 3.6 アンケートの質問内容

番号	質問と選択肢
1	<p>「あなたについて教えてください」</p> <p>①性別 ②職業 ③居住地 ④尼崎運河までの移動時間</p>
2	<p>「各活動における参加・不参加を確認」 参加した, 参加していない</p> <p>「活動内容」</p> <p>①花壇づくり ②水質浄化活動 ③堆肥づくり ④潮だまりづくり</p> <p>⑤レキ浜づくり ⑥ヨシ原づくり ⑦イボニシ・ウミニナの定着実験</p> <p>⑧スタンドアップパドルボード(SUP)体験</p>
3	<p>「今後も浄化施設のイベントに参加したいと思いますか？」</p> <p>①とてほしい ②機会があればほしい</p> <p>③分からない ④参加したくない</p>

### 3.3.2 結果

#### (1) 人工干潟の順応的管理

人工干潟での干潟づくり活動の結果, 実施 1 ヶ月後の区画①潮だまりでは, 2014 年 8 月にハゼ類:  $5\text{ind./m}^2$ , スジエビモドキ:  $3\text{ind./m}^2$ , 2015 年 1 月にはヨコエビ類:  $1012\text{ind./m}^2$ , 多毛類:  $88\text{ind./m}^2$  の新規加入生物が確認された. 区画③④には根から育てたヨシを植栽した. 干潟東側に移植したヨシの本数は移植時 107 本だった. 4 カ月後に測定した結果, 234 本に増加していた. これは移植時からの本数の 2 倍以上である. 本数が増えていることから定着が進んでいると考える.

コウロエンカワヒバリガイの加入抑制効果は, ヨシ植栽後の 2014 年 1 月に, 人工干潟最東端部のヨシ植栽区および, 対照区でコドラートを用いたコウロエンカワヒバ

リガイの生存量調査をおこなった。その結果、両区でコウロエンカワヒバリガイの加入は認められず、加入抑制ができたと言える。また、抑制の要因としては地盤高変更の要素が強かったことが推測される。

次に、2014年10月にヨシを採取し、茎は99cmと8cmのものを20cmごとに細分化し、葉は21枚を測定した。その後、1本あたりのヨシの含有窒素量・炭素量を測定した。その測定値からヨシによる窒素・炭素固定量を1m<sup>2</sup>あたりに換算した結果、窒素固定量は6.2gN/m<sup>2</sup>、炭素固定量は176.2 gC/m<sup>2</sup>であり、ヨシによる窒素および炭素の固定効果が確認された。これらのヨシは、2014年10月17日に枯死が確認されたため、市民協働で地下茎を残して刈り取りを実施した。

次に、アンケート結果を図3.18に示す。参加した活動別の今後の環境活動への参加意欲は、干潟づくり活動の参加者で高い傾向が見受けられた。干潟づくり活動の計画は意見を出しあい、プランを決定した自主検討型活動であり、他の活動はイベント型活動であった。これらの結果より、受動的に関わるイベント型活動よりも能動的に関わる自主検討型活動の方が、今後の活動参加意欲が高まることが示唆された。

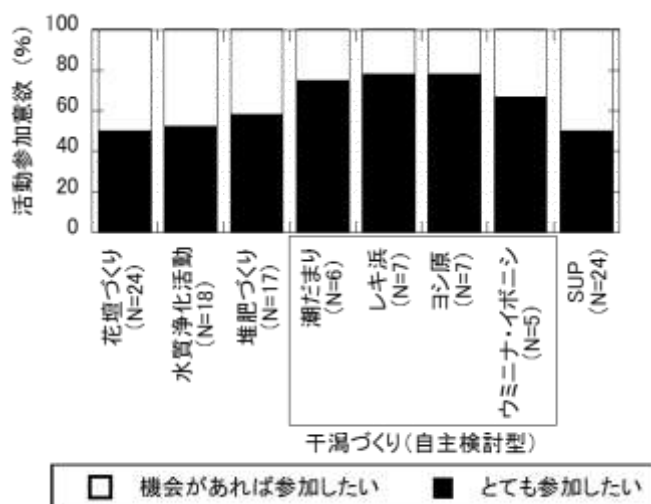


図3.18 参加した活動ごとの今後の参加意欲

## (2) 生態系サービスによる機能の分類

生態系サービスとは、人間が日々の暮らしの中で、自然界から享受する様々な恩恵を示す。生態系に備わった機能のうち、人類が享受できる価値を示す生態系サービスは、各生態系の重要性を定量的に評価するための尺度でもある。国連の主導で行われたミレニアム生態系評価(MA: Millennium Ecosystem Assessment, 2005)では、生態系サービスを食料、水、木材、繊維などの「供給サービス」、気候の安定、水質の浄化、廃棄物などに影響する「調整サービス」、レクリエーションや精神的な恩恵を与える「文化的サービス」、栄養塩循環、土壌形成、光合成などの「基盤サービス」の4つに分類されている。これらのサービスは人間の福利に密接に関わっており、人間が豊かな生活を送るうえで必要不可欠な存在である。各サービスの概要については図3.19に示す。このMAの中で、生態系の機能の低下を防ぐための提言が示されており、主



に、①意志決定に対する経済的な背景を変えること、②政策や計画、管理を改善すること、③個人の行動に影響を及ぼすこと、④環境に優しい技術を開発し利用することが示されている(表 3.7)。また、生物多様性条約第 10 回締約国会議(COP10)において採択された愛知目標 の達成に向けた日本のロードマップとして、生物多様性国家戦略 2012-2020 が作成され、2011 年 3 月に発生した東日本大震災を踏まえた今後の自然と共生する社会のあり方を検討していく必要性が示されている(環境省、2012)。

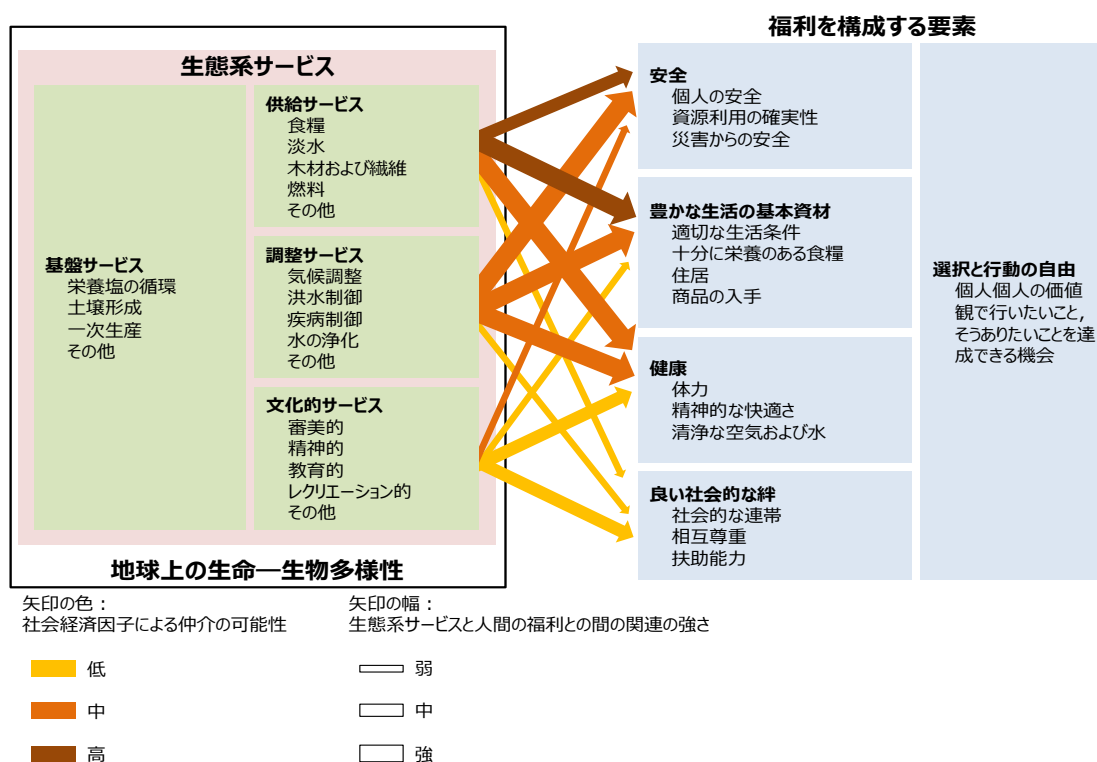


図 3.19 生態系サービスと人間の福利の関係  
(ミレニアム生態系評価, 2005)

表 3.7 生態系の機能の低下を防ぐための提言  
(ミレニアム生態系評価, 2005)

提言内容	詳細
①意志決定に対する経済的な背景を変えること	決定を行う場合, 市場価格として評価されない生態系サービスの価値も考慮すべきこと
	人間と環境を害する農業・漁業・エネルギーへの助成金をやめること
	生態系サービスを保護し, 社会にとって価値のあるような方法で土地を管理している土地所有者に報奨金を支払うこと
②政策や計画、管理を改善すること	生態系の保護に政策の焦点が定まるよう関係部局間あるいは国際機関等の意志決定を統合すること
	追加の保護区域を特に海域において設定すること. 既存の保護区域に大きな財政上, 管理上の支援を与えること
③個人の行動に影響を及ぼすこと	生態系サービスの低下を押さえるための理由と方法に関し人々を教育すること
	持続的な方法により生産された産品を購入する上での選択を与えるための信頼できる証明システムを構築すること
④環境に優しい技術を開発し利用すること	生態系への悪影響の少ない食料増産のための技術に投資すること
	質が低下した生態系の回復を図ること

近年, 世界的には, 経済協力開発機構(OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development), 国連食糧農業機関(FAO : Food and Agriculture Organization), 生態系と生物多様性の経済学(TEEB : The Economics of Ecosystems and Biodiversity), 国連統計局(CICES : Common International Classification for Ecosystem Services), 企業のための生態系サービス評価(ESR : The Corporate Ecosystem Services Review)などにより, 生態系サービスの整理が行われており, 経済的に評価する研究が進められている. この分類において, Fisher(2009)は, 供給・調整・文化・基盤サービスの4分類では, 受益者の視点を考慮せず, 中間で生じるサービスをすべて便益として評価することは過大評価につながると指摘しており, 評価の目的に応じて分類を検討する必要があるとしている. 表 3.8 に國井(2016)により作成された MA, TEEB, CICES の分類比較表を示す. また國井(2016)は, 農業や農村における「多面的機能」と「生態系サービス」の定義について, 国内では並列に扱われており, 世界的には生態系の有する「機能」から便益として受け取る「サービス」が分けて考えられているため, 国際的な生態系サービスに関する議論や研究を進める上では, 「機能」と「サービス」を明確に区分・整理する必要があることを指摘している.

表 3.8 MA, TEEB, CICES による生態系サービスの分類(國井, 2016)

MA		TEEB		CICES	
サービス	要素	サービス	要素	サービス	要素
供給	食料	供給	食料	供給	栄養塩
	淡水		水資源		水供給
	繊維		原材料		物質
	燃料		遺伝子資源		
	遺伝子資源		薬用資源		
	生化学物質		鑑賞資源		
	装飾品の素材				エネルギー
調整	大気の質の調節	調整	大気の質の調整	調整・維持	生物物理的環境の調整
	水の浄化と廃棄物の処理		廃棄物の処理 (特に水質浄化)		フローの調整
	自然災害の防護		局所災害の緩和		
	水の調節		水量調節		物理化学的環境の調整
	土壌侵食の抑制		土壌侵食の抑制		
	気候の調節		気候調整		
	土壌形成 (基盤サービス)		地力の維持		生物環境の調整
	花粉媒介		花粉媒介		
	病虫害の抑制		生物学的防除		
	疾病予防				
基盤	光合成・一次生産・栄養塩循環・水循環	生息・生育地	生息・生育環境の提供		
			遺伝的多様性の保全		
文化的	教育的価値	文化的	科学や教育に関する知識	文化的	象徴的
	審美的価値		審美的な情報		知的・経験的
	場所の感覚		レクリエーションや観光の場と機会		
	娯楽とエコツーリズム		文化、芸術、デザインのインスピレーション		
	文化的多様性				
	インスピレーション				
	文化的遺産価値				
	精神的・宗教的価値		神秘的体験		
	知識体系(伝統的, 習慣的)				
	社会的関係				

TEEB では、生態学と経済学の両面からの評価により、生態系サービスにおける貨幣換算が行われている。Costanza *et al.*(1997)は様々な生態系サービスを経済価値に換算しており、浅海域は約 2.2 万ドル/ha/年、熱帯雨林は約 2 千ドル/ha/年、森林は約 0.9 千ドル/ha/年と見積られている。これらを合計すると、全世界での生態系サービスから得られる価値は年間 33 兆ドルにも達すると試算されている。このように生態系サービスや生物多様性を評価し貨幣価値に換算する目的として、現状で最も多くの人々が納得できる基準が経済的な価値基準であるからであり、そのことを通じて価値をビジネスや政策などの意思決定に取り入れることである(小路ら, 2011)。経済評価が様々な分野で利活用される機会が増すことにより、その重要性も増すことになると考えられる。これを実現するためには生態系サービスの経済的価値を評価することが不可欠であり、生物多様性の喪失により社会が受けるダメージ(コスト)を把握し、生態系保全の社会的意義を示す必要があると考えられる。しかしながら、生態系サービスには市場価格が存在しないため、価値を金額で評価することは困難である。図 3.20 に示すように、生態系サービスの価値には、利用価値と非利用価値の両方の性質があるため(馬奈木, 2011)、生態系サービスの経済価値を評価するためには、一般的に顕示選好法と表明選好法を利用し経済価値を評価している(吉田, 2013)。顕示選好法は、環境が消費行動に及ぼす影響を観察することで間接的に環境の価値を推定する方法であり、利用価値が対象とされている。主に「代替法」、「トラベルコスト法」、「ヘドニック法」がある。表明選好法は人々にアンケート調査などにより直接ヒアリングすることで環境の価値を評価する手法であり、利用価値のみならず非利用価値も対象として

評価できる手法である．主に「仮想評価法(CVM)」、「コンジョイント分析」がある．各々の手法には評価に適した対象や特徴が存在するため，経済的価値を評価するにあたっては，目的に沿った手法の選択が必要である．

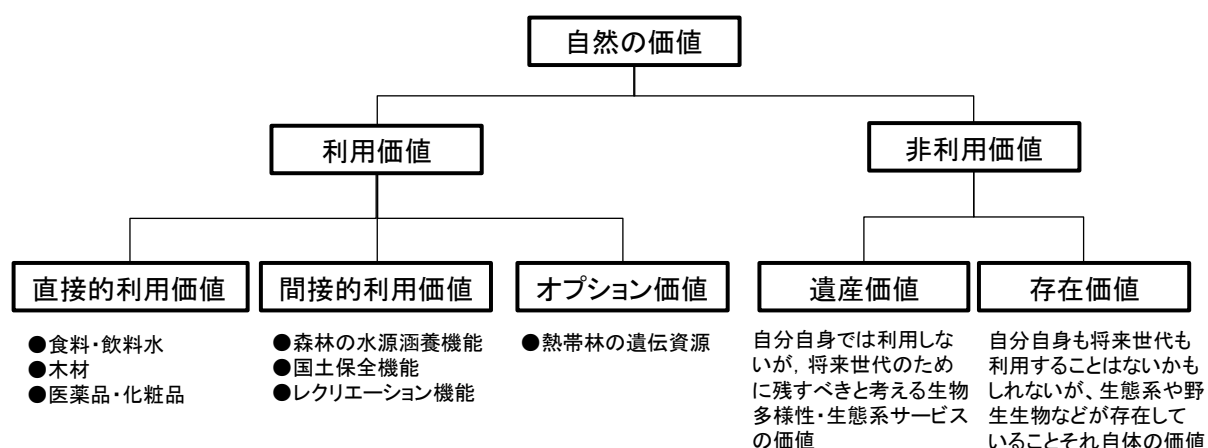


図 3.20 自然の価値における分類 (馬奈木, 2011)

経済価値に換算することはあくまで一手法であり，経済価値の大きさにより重要度に差があるわけではなく，すべての生態系サービスが人間にとって重要な要素であることを認識することが必要であると考ええる．また，生物多様性や生態系サービスの経済的価値を評価する研究事例は数多く存在しているが，これらは生態系が持つ機能の一部を評価しているに過ぎない点を認識しておくことも重要である．

Costanza *et al.*(2014)はすべての項目が経済価値に換算することは困難であるとも指摘しており，近年では貨幣価値に換算しない新たな評価手法についても提案がなされている．例えば海域においては，海洋健全度(Halpern, B *et al.* (2012)) が提案されており，海域の理想状態と現状を比較し，さらに持続可能性も評価できる手法である．このような手法を用い渡辺ら(2015)は干潟における調整サービスについて，岡田ら(2013)は干潟域の文化サービスについて貨幣換算以外の定量化を試みている．その他，青木ら(2011)は，東京湾内湾の人工干潟と天然干潟における二枚貝相を比較しており，人工か天然かはあまり重要でなく，湾内の位置により決まることを指摘している．さらに東京湾内で横浜海の公園は多くの潮干狩り客を集めており，成功している事例であり，人工干潟から得られる生態系サービスを享受していると考察している．このように人工干潟を造設する場所によって，期待される生態系サービスは限定されるため，場所に関わらず，生態系機能を優先するのではなく，予想される生態系サービスを考慮した造成計画を立案することが重要であると指摘している．岡田ら(2015)は，干潟から得られる文化的サービスについて，各地の干潟が持つ歴史や物理的な構造，社会的背景に影響を受け，得られるサービスの内容や程度に差異が生じることを明らかにしている．金子ら(2012)は，海岸砂丘において，地下の淡水層と酒造との関係性について供給・基盤・文化的サービスの視点から検討しており，海岸域の土地利用のあり

方について生態系サービスの観点を取り入れる必要があることを指摘している。太田ら(2012)は、干潟における文化サービスにおいて、精神的療養や環境教育としての利用について検討しており、一般住民は多様な情報を考慮し文化サービスの主観的価値を決定していることを明らかにしている。

生態系サービスを評価する上での課題として、伊藤ら(2015)は異分野間の連携(例えば、自然科学と社会科学など)が困難であること、生態系サービスに関するトレードオフの問題を指摘している。具体的には、植林地は単一主から構成されることが多く、多様性の低下やレクリエーションの場所に不向きであることや、造成時に土壌が流出し、栄養塩や保水力が失われることが指摘されている。その他、専門家以外の一般市民に対し、生態系サービスの概念を広く周知し、重要性を認識してもらうことが必要である。佐野ら(2014)は都市住民の環境に対する意識を生態系サービスの概念を用いて調査を行っており、都市の生態系サービスとして緑地や景観の美しさ、浄化機能が都市部において重要であるとの意識が高いことを示しており、都市環境の自然管理は人間にとって価値のある形を目指して行うべきと論じている。

前述したとおり、生態系サービスの評価として、一般的には貨幣換算により評価されているが、その数値については瞬間的な評価であるため、常時持続性の評価や社会創生機能としての評価はされていない。継続したモニタリング調査により変化を踏まえた評価を行うことが課題である。そこで、本研究では貨幣換算できない社会創生の視点や持続的沿岸域の生態系の価値評価を行うことを試みる。生態系サービスの分類は、MAに基づき、基盤サービス、供給サービス、調整サービス、文化サービスの4項目に分類し、さらに環境省(2013)、太田ら(2012)、本田(2010)が提唱する沿岸域の生態系サービスとしての項目を統合し設定した。表3.9、表3.10、表3.11に尼崎運河での市民協働活動における生態系サービスを示す。

表 3.9 にて基盤サービスとして、魚類の加入や生物の直立護岸壁面への付着が確認されており、生物多様性および生息場サービスは存在していたと考えられる。また水場が存在することで、気温調整サービスを提供していた。また尼崎運河そのものが水位管理をされており、洪水、高潮被害の緩和サービスも有している。本施設竣工以前から、運河沿いの歩道が整備されウォーキング等に利用されてきた。また、運河クルージングも開催されてきたことからレクリエーションサービスも有していた。伝統行事としては、尼崎運河に一般市民を呼び込み、存在を周知することを目的とした運河博覧会が年に一度開催されており、地元住民に対する伝統行事サービスも少なからず有していたと考える。

表 3.10 にて市民協働活動により提供された生態系サービスを示す。環境学習会では、療養サービスとして、生物・水との触れ合いの場や機会を提供しており、教育サービスとして、水質浄化についての教育の場や機会を提供している。浄化活動では、供給サービスとして、浄化に寄与した生物を陸域に取り上げることで海産バイオマスを供給しており、それらを尼崎運河内から除去することで調整サービスとして水質浄化を提供している。干潟改良では、モニタリングの結果得られた課題を順応的管理の一環として解決することで、基盤サービスとして生物多様性と生物生息場が更に提供されている。スタンドアップパドルボート(以下、SUP)というレジャー体験によって、レ

クリエイションサービスが、実際に運河水面を利活用することによって親水効果が発現し、水に対する教育効果が提供されている。また、本活動を行う団体が自主的に開始した SUP を用いた運河内での清掃活動によって、景観保護という文化サービスが提供されている。花壇づくりでは、陸域に花壇を造成することにより、生物多様性と生物生息場が提供された。また、海産バイオマス堆肥の製造や、それを用いた作物の栽培によって原材料(堆肥)や食料(作物)が提供された。尼崎運河から取り上げた藻類や二枚貝を、実際に陸域で堆肥として利用し、物質循環を実践することで水質浄化にも寄与している。また、企画者が中学校であることから、多くの中学生が花壇づくりには参加し、大学生や一般市民との交流といった世代間交流を提供する側面も有している。キャナルウォークは、市民が自主的に企画し、主催しており尼崎運河を中心とした地元住民が定期的集う集会、つまり伝統行事という文化サービスを提供している。環境ガイド養成講座は、市民への水質、防災、地域の歴史教育、生物観察といった教育、療養サービスを提供している。また、ここでもキャナルウォークを主催している市民達が集まることから、伝統行事としての側面も有している。さらに、ここで学習した市民が実際に一般市民向けの運河周辺での観光ガイドを実践しており、尼崎運河周辺に新たなレクリエーションを提供している。

表 3.11 には懸濁物除去水槽、栄養塩回収水路、人工干潟、船着き場、施設全体に関する生態系サービスをハード整備によって享受可能になったサービス、浄化活動に関する生態系サービスをソフト整備(浄化活動という仕組みを整備)によって享受可能になったサービスとして分類している。

表 3.9 尼崎運河が有する生態系サービス

	生態系サービス
尼崎運河	基盤：生物多様性(壁面への生物付着、魚類の加入) 生物生息場(直立護岸) 一次生産 栄養塩の循環 調整：気温調整 洪水、高潮被害の緩和 文化：レクリエーション(ボードウォーク整備によるウォーキング、クルージング) 伝統行事(運河博覧会、年 1 回開催)

表 3.10 市民協働活動により提供された生態系サービス

活動名	生態系サービスの種類
環境学習会	文化：療養(生物、水との触れ合いの場) 教育(水質浄化についての教育の場)
浄化活動	供給：原材料(海産バイオマス堆肥の供給)

	調整：水質浄化(物質循環の促進)
干潟改良	基盤：生物多様性(順応的管理による拡大) 生物生息場(順応的管理による拡大)
スタンドアアップパドルボード(SUP)	文化：レクリエーション(SUP 体験) 教育(SUP による親水効果)
花壇づくり	基盤：生物多様性(順応的管理による拡大) 生物生息場(順応的管理による拡大) 供給：原材料(海産バイオマス堆肥の供給) 食料(堆肥を用いた作物の栽培) 調整：水質浄化(物質循環の実践) 文化：教育(世代間交流)
キャナルウォーク	文化：伝統行事(地域の人が集う機会)
環境ガイド養成講座	文化：教育(水質，防災，歴史教育) 療養・教育(生物観察) 伝統行事(地域の人が集う機会) レクリエーション(市民による観光ガイド)

表 3.11 本施設竣工によって享受可能になった生態系サービス

区画名	生態系サービス
懸濁物除去水槽	供給：海産バイオマスの供給 調整：PN,PP 除去
栄養塩回収水路	供給：海産バイオマスの供給 調整：DIN,DIP 除去
人工干潟	基盤：生物生息場の創出 潮間帯の創出 生物の新規加入 文化：ヨシのある風景
船着き場	文化：SUP，クルーズの乗降場を提供
本施設全体	基盤：栄養塩の陸域への循環 文化：生物・水との触れ合いの場，水質浄化についての教育の場
浄化活動	供給：海産バイオマス堆肥の供給 調整：堆肥を用いた物質循環の促進

### 3.3.3 考察

#### (1) 生態系サービスの評価

参与観察により確認された尼崎運河水質浄化施設竣工前および直後の生態系サービスについて表 3.12 に示す。また，表 3.11 にて「ハード由来のサービス」は，施設

そのものの存在によって享受可能となったサービスを示しており、「ソフト由来のサービス」は建設当初から想定されていた市民協働活動である浄化活動の実施によって享受可能となったものを示す。図 3.21 の「二次的サービス」とは、施設もしくは浄化活動という場や機会を提供することで出現した市民協働活動によって享受可能になったサービスを示し、「三次的サービス」とは新たに出現した市民協働活動によって、更に新しく出現した活動によって享受可能になったサービスを示す。なお、図 3.21 に示す各項目を結ぶ矢印は関係者からのヒアリング調査の結果および参与観察により確認されたつながりを示す。

その結果、まず市民協働活動が増えるに従い、尼崎運河周辺で享受可能となるサービスの種や量が増加していることが明らかになった。1 点目の特徴的な点として、二次的サービス、三次的サービスを提供する活動への発展は、複数の種類のサービスによる相互作用によって成されている場合も確認できた。例えば、本施設の竣工によって浅場に生息する生物の加入、生息場といった、水や生き物と触れ合う「場」と「機会」が創出されたことで、実際に施設内での生物観察という教育サービスの利用が可能となったことが挙げられる。

また、活動が発展することにより、ハード整備、ソフト整備のみでは創出できなかったサービスが新たに提供された。例えば、本施設の竣工によって浅場に生息する生物の加入、生息場といった、水や生き物と触れ合う「場」と「機会」が創出されたことで、実際に施設内での生物観察という「楽しみ」や「癒し」といった療養サービスの利用が可能となった。さらに、環境教育、観光ガイド養成講座、運河ウォーク、浄化活動などの市民が集い活動できる場が提供されたことで、彼らが定期的に集まることができる「機会」という伝統行事サービスが新たに提供された。

2 点目の特徴的な点として、二次的、三次的サービスが拡大していくことにより活動内容と提供されるサービスが「世代間交流、地域の人々が定期的に集まる場、市民による観光ガイド」等、地域の特色を活かした活動内容へと変化している点や市民の自発性の高まりがみられる点である。また、市民の参加者に対し実施したヒアリング内容(詳細は後述)から、活動関係者が水質浄化のみならず、「尼崎運河を中心とした尼崎市全体の活性化やまちづくり」を最終的な目的にしていることから明らかである。



表 3.12 尼崎運河水質浄化施設竣工前および直後の生態系サービス

	生態系サービス	施設竣工前のサービス	ハード由来のサービス	ソフト由来のサービス
基盤	生物多様性	付着生物, 魚類加入	生物の新規加入 ★	—
	生物生息場	直立護岸	生息場の提供 ★	—
供給	食料	—	潮間帯の創出	海産バイオマス堆肥を用いた食物の栽培
	原材料	—	—	海産バイオマスの供給
調整	大気質調整	気温調整	—	—
	局所災害の緩和	洪水, 高潮被害の緩和	—	—
	水質浄化	—	DIN,DIP, PN, PP除去 水質浄化活動の場を提供	海産バイオマスの堆肥化栽培による物質循環
	生物学的防除	—	—	—
文化	自然景観の保全	—	ヨシのある風景	—
	レクリエーション	ボードウォーク クルーズイベント	生物や水との触れ合いの場を提供 SUP, クルーズ乗降場を提供	—
	療養	—	—	—
	教育	—	水質浄化の仕組みについての教育の場を提供	—
	伝統行事	運河博覧会	—	—

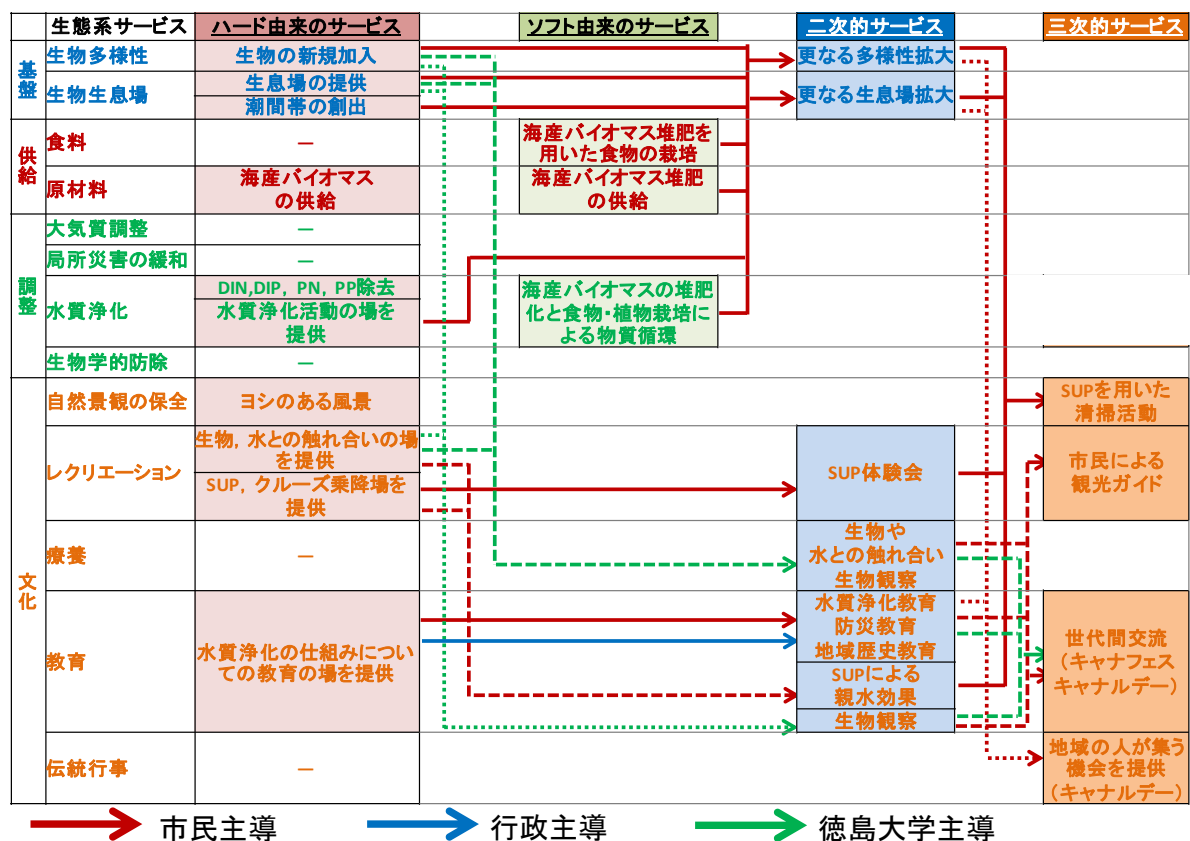


図 3.21 尼崎運河での市民協働活動における生態系サービスの推移

## (2) 社会的ニーズと協働創生の要因

参与観察により把握した本施設における生態系サービスを表3.13に示す。本施設は浄化機能と親水機能(船着き場、環境学習を行う場としての機能)に必要な設備を有している。表3.13ではこのハード面の整備により享受できるようになった生態系サービスが「水質浄化施設の機能により受けられる生態系サービス」として示されている。興味深いのは、この他に主に「市民協働活動により受けられる生態系サービス」に含まれる一般市民の自主企画によるESD(水質浄化教育、防災教育、地域歴史教育)(環境省、2013)、SUP体験による親水効果といった項目は、浄化活動に参画する市民団体が運河および本施設がもつ魅力や機能を活用することで、二次的に発生したものである。また、本施設の持つ親水護岸を利用しているSUP団体による自主的な運河内の清掃活動や、浄化活動やイベントが世代間交流や地域の人が集う場を提供するなど、二次的に発生した生態系サービスから、さらに三次的なサービスが創出されていることも特徴である。このように、本施設が中心となり、二次的、三次的な生態系サービスが本来施設の有する機能枠を超えて出現していることは、本事業の大きな特徴である。

表 3.13 参与観察により確認された生態系サービス  
(■二次的、■三次的に発生した生態系サービス)

	文献調査による沿岸域での生態系サービス	事業前の運河の生態系サービス	水質浄化施設の機能により受けられる生態系サービス				市民協働活動により受けられる生態系サービス		
			懸濁物除去水槽	栄養塩回収水路	人工干潟	親水護岸	浄化活動	ESD	イベント
基盤	生物多様性	付着生物、魚類(ボラ、クロダイ)の加入	-	ヨコエビ類、多毛類、フナムシの加入	ヨコエビ類、多毛類、ハゼ類、スジエビ類の加入	-	更なる多様性拡大	-	-
	生息環境の提供	直立護岸	付着生物の生息場提供	藻類の生息場提供	潮間帯の創出	-	更なる生息場拡大	-	-
供給	食料	-	-	-	-	-	海産バイオマス堆肥を用いた食物の栽培	-	-
	原材料	-	海産バイオマスの供給	海産バイオマスの供給	海産バイオマスの供給	-	海産バイオマス堆肥の供給	-	-
調整	大気質調整	気温調整	-	-	-	-	-	-	-
	局所災害の緩和	洪水、高潮被害の緩和	-	-	-	-	-	-	-
	水質浄化	-	PN、PP除去、水質浄化活動の場を提供	DIN、DIP除去、水質浄化活動の場を提供	DIN、DIP除去、PN、PP除去、水質浄化活動の場を提供	-	海産バイオマスの堆肥化による物質循環	-	-
	生物学的防除	-	にがりの除去	富栄養化抑制	食物連鎖の拡大による赤潮発生抑制	-	-	-	-
文化	自然景観の保全	-	-	-	ヨシのある風景	-	SUPを用いた清掃活動	-	-
	レクリエーション	ボードウォーク、クルーズイベント	生物との触れ合いの場、親水性のある場を提供	生物との触れ合いの場、親水性のある場を提供	生物との触れ合いの場、親水性のある場を提供	SUP、クルーズの乗降場を提供	-	-	市民による観光ガイド SUP体験会
	療養	-	-	-	-	-	生物、水との触れ合い	-	生物、水との触れ合い、生物観察
	教育	-	二枚貝による水質浄化の仕組み等、教育の場を提供	藻類による水質浄化の仕組み等、教育の場を提供	干潟生物による水質浄化の仕組み等、教育の場を提供	-	世代間交流	水質浄化教育 防災教育 地域歴史教育	SUPによる親水効果 生物観察
	伝統行事	運河博覧会(うんばく)開催	-	-	-	-	地域の人が集う機会を提供	-	地域の人が集う機会を提供

市民協働活動に参加する関係者4名へのヒアリングの結果を表3.14に示す。「尼崎運河での市民協働活動は仲間に会える、自分のことができる、やりたいことができる」ことが活動参加者のモチベーションの維持に繋がっていることから、尼崎運河でもステークホルダー間の平等性は協働活動を続けて行く上で必要な要素であり、「尼崎運河まるまるクラブ」が平等性を維持できていることが示唆された。このように、付加的な要素が発生した理由として、本事業では市民協働による活動を水質浄化

システムの一部と位置づけ、NPO、大学、行政など多様なグループの協働参画を促していることが施設の存在を周知させ、本施設の存在価値や尼崎運河の価値を向上させていることが考えられる。また、都市近郊に局所的に存在する生態系サービスが、都市に住む人々の生活・文化の質を向上させることが知られており(Per Bolund, 1999)、本施設が有する生態系サービスも、同様の機能を有していると考えられる。

2014年度の水質浄化施設の利用者は2551名であり、研究、環境学習、レクリエーションの場として、多くの市民が生態系サービスを享受できる場として利用されている。このように、本施設は水質浄化のみならず、市民が生態系サービスを享受できる仕組みとして機能する物であると言える。生態系サービスにおける課題として、生態系の機能について整理すること、その機能がどのような要因で影響を与えるのかなどを明らかにすることが課題である。そのため、生態学、社会学、経済学など学問の垣根を超えた広い視野での評価が重要である。本運河においても、著者らは環境工学と社会科学の観点から着目し、事業運営に最適な方法をさらに検討していく必要があると考えている。課題としては、現在の尼崎運河における環境改善活動は、学・官・民が主体となり活動を行っているが、さらに広く普及・発展させるため、企業など新たな団体の参画を促す方法を検討していく必要がある。また、貨幣価値に換算できない生態系サービスの評価方法の確立も重要な課題といえる。

表3.14 市民協働活動に参加する関係者へのヒアリング内容

阿部 : NPO 法人	
動機, いきさつ	21 世紀森づくりの協議会委員, まちづくり委員であったが具体的な活動の場がなかった。運河の環境をみて、「なんとかせなあかん」と感じた。そこで、とにかく人に運河(存在, 状況)を知ってもらいたくて、まずピアガーデンを始めた。翌年にはカフェを始めた。翌々年から運河博覧会(うんぱく)を始めた。そのとき、シーブルー事業の委員となり、実証実験水路での取組みをうんぱくで PR するようになった
活動の目的	うんぱくを通して、運河のことを知ってもらいたい。ここでの様々な活動についてもっと知ってもらうこと、それを通じて運河が綺麗になれば良いと思う。
モチベーション	もともと、運河周辺は治安が悪く、まちづくりの中でもネックであった。まちをもっとよくするためには、水を綺麗にしたいし、ボードウォーク等もある(良い場所)なのに、行政はなかなか PR してくれないので、うんぱくを通してやっている。森づくりから運河に関わってきて、うんぱくも(いつまで続くか分からないが)、乗りかかった船であるので、最後までやりきってやろうという気持ち
後継者	いない。水質とまちづくり、どちらも分かっている人材が欲しい。
良く連絡する人	山中(大学), 岸本(SUP 団体), 薄井(行政)
自分の役割	運河を知ってもらい、多くの人に来てもらうようにすること

大津 ：一般	
動機, いきさつ	もともと定年後, 21 世紀の森でボランティアをしてきたが身体的負担が大きかった。そのとき, 県が運河のことについて講習をしており, それを聞きに来たことがきっかけとなった。その後から運河で活動を始めている。
活動の目的	運河の水をもっと綺麗にできたらと思っている。 今の施設で綺麗にできるのかは半信半疑である。
モチベーション	自分は水質のこととかはあまり分からないから, エサやりとか水やりとか自分のできることとしている。バイクで 5 分と近いので, 負担ではない。むしろ花壇は自分の菜園みたいなもので, 庭に水やりするのと大差ない。ヒマワリなどは, 丁寧に育てたらあんなにも綺麗に花が咲く, そうというのが良い。
後継者	いない。しかし, 今年からはキャナルデーの案内等はキャナルガイドに転送している。少しでも興味を持ってきてくれたらよいと思っている。キャナルフェスやうんぱくにも一般の人が多く来るので, そういった人々に勧誘したら良いのではないか。
良く連絡する人	金(行政), 21 世紀の森関係の友達(一般)
自分の役割	水やりや餌やりなどのメンテナンスは自分の役割かな? と思っている

薄井 ：尼崎市職員	
動機, いきさつ	行政の異動でここに来た。森づくりの方が始めはメインであったが, フィールドに運河が入っていたので運河に来た。
活動の目的	尼崎市を盛り上げて行きたい, 21 世紀の森や空き地などを, 自然を利用するといった形で活性化させたい。
モチベーション	活動をはじめてから, 自分の街への思いがだんだんと強くなっている。自分で思っていることができる, 活動をコントロールできることがおもしろい。できること, できないことがある中で, できことを自分で選んで進めていけるので良い。
後継者	仕事としては, 自分が異動すれば自動的に後任が決まるが, 引き継ぎするなら, 仕事としてだけでなく, もっと主体的に関わってほしいと思う。自分は異動したあとも趣味レベルで参画したいと考えている。
良く連絡する人	山中(大学), 尼崎港管理事務所(行政), 兵庫県(行政), キャナルガイド(一般)
自分の役割	行政, 市民間の連絡, 行政としての立場から広報, 情報発信のため

中岡 ：尼崎市立中学教員	
動機, いきさつ	尼崎で巣箱の研究, 環境教育の発信をしていた。そのときはまちのゴミ掃除や緑化をしていた。そのとき, たまたま庄下川のクリーンアップ活動に生徒と参加したとき, 田尻さん(行政)と知り合い, 運河を紹介してもらった。ちょうどその時, まちや森だけでなく, 海や川も含めた広い範囲, 視点で環境を考えなければと思っていた。尼崎運河では, 水を綺麗にして生物堆肥等で

	緑化もできて、とても面白かった。技術の授業にも運河を取り入れたりしながら、やってきて、志を持った人と出会うことができ、こういう人たちと一緒に環境を良くし、命の育みや物質循環といった「理」とともに、教育と道徳を教えて行きたいと思った。
活動の目的	教育、尼崎を綺麗にするということ。それに加えて、世界平和を目指したい。環境活動を通して、自分自身を高める、人と人との助け合い、思いやり、補助の精神を育み、人と人の繋がりを作りたい、そういった場にしたいと思っている。尼崎運河を人の居場所にしたい。「良いことを考える」場所にしたい、考えることの気づき、きっかけづくりの場所にしたい。
モチベーション	運河にくると仲間に会える。仲間と話をすることが楽しいし、仲間のために頑張りたい、一緒にやりたい、思いやりや心遣いの持てる場所が心地良い。仲間には上下も教師、生徒という立場も関係がないので良い。
後継者	学校の先生という立場からは後継者は生まれないと思っている。 ネイチャークラブ(中学校の部活動)を通じて運河に来てくれる子ども(にちゃん、浜ちゃん、難波くん：ネイチャークラブ OB)が自分の後継者たる人間になってくれるのではないかと考えている。後継者は決めていないが、自分がもしも活動に参加できなくなったとき、自然と生まれるのではないかと考えている。
良く連絡する人	山中(大学)、上月(大学)、中西(NPO)
自分の役割	中学生たちへの教育、仲間づくりを子どもたちへ教え繋げる。 子どもと大人を繋げるのが自分の役割である。

### (3) 企業活動との協働による共創関係に関する一考察

尼崎運河における市民協働活動を持続可能なものに発展させていくためには、新たな団体の参画も重要である。新たな参画団体として「企業」がこのような活動に参画することへの展望についての考えを述べる。

近年、日本社会を取り巻く環境は変化を続け、人口減少・高齢化、化石燃料費の増加、低い幸福度、地域コミュニティの衰退等の社会・環境に対する課題が山積している(環境省, 2016)。日本企業に着目した場合、グローバル経済の進展、国内外の企業間競争の激化、労働力人口の減少等、企業を取り巻く環境は大きく変化している。企業活動を持続可能なものにするためには、社会・環境を持続可能な状況にする必要がある。持続可能な社会の構築を目指すため、2010年にすべての組織を対象とする社会的責任に関する国際的ガイドラインが策定された(表 3.14)(ISO26000)。これは、持続可能な社会への組織の貢献を促すものであり、7つの原則と7つの主要課題から成り立つものである(表 3.15 参照)。このような動きが高まるなか、企業においても社会的責任(CSR : Corporate Social Responsibility)の概念が浸透し、近年では実績を紹介する企業も増加している(トヨタ自動車,2016, アサヒビール,2016, 神戸製鋼所,2016)。一方で、企業組織の現場では、雇用形態の多様化、メンタルヘルス不調者の増加、コミ

コミュニケーション能力の低下、業務へのモチベーション低下といった組織力の弱体化が問題視されている(黒田ら,2014, 土屋,2012, Y.Okumura,2011)。

3.3.3(2)項で論じた通り、尼崎運河水質浄化活動は、産・学・官・民の多様なグループの協働参画により成り立っているが、環境改善活動をさらに広く普及・発展させるためには、より多くの企業の参画が必要と考えられる。しかしながら、企業においては、CSR として観点のみでは参画することは難しく、参画したとしても、活動資金の支援のみにとどまり、かつ継続的な参画は見込めない。そこで、前述した企業組織が抱える課題を尼崎運河水質浄化施設における市民協働活動に参画することで解消するための人材育成プログラムを考案し、企業研修の場としての新たな利活用方法を検討する。

表 3.15 ISO26000 の概要

特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>○企業のみならずあらゆる組織が対象</li> <li>○第三社認証を目的としない、ガイダンス文章</li> <li>○CSR 全般における主要項目を含む</li> </ul>
社会的責任の定義	<p>透明かつ倫理的な行動を通じて、組織の決定および活動が社会・環境に及ぼす影響に対する組織の責任</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○持続可能な開発、健康および社会の繁栄への貢献</li> <li>○ステークホルダーの期待への拝領</li> <li>○適用される法令の遵守および国際行動規範の尊重</li> <li>○組織全体で統合され、組織の関係の中で実践される行動</li> </ul>
中核主題の分類	<p>&lt;原則&gt;</p> <p>1)説明責任 2)透明性 3)倫理的行動</p> <p>4)ステークホルダーの利害尊重 5)法令順守</p> <p>6)国際行動規範の尊重 7)人権尊重</p> <p>&lt;課題&gt;</p> <p>1)組織統治 2)人権 3)労働慣行 4)環境</p> <p>5)公正な事業慣行 6)消費者問題 7)地域社会への参画</p>

尼崎運河における環境改善活動が企業社員へ与える効果を評価するため、表 3.16 に示す内容を実施した。今回は関西の水処理・廃棄物処理プラントメーカーに勤務する入社 5 年目以下の若手社員を対象とした。参加者には事前に尼崎運河における地理的特性、歴史的背景、現在までの活動経緯を伝えている。調査方法は、環境改善活動に参加する前後でアンケートを実施し、環境改善活動が企業人へ与える効果を調査した。アンケート内容は、参加企業人の勤務する企業における企業倫理規範を基に作成し、環境保全・社会貢献への意識の変化を評価した。さらに、社会で求められる社会人基礎力 (働く意識と取組み姿勢、責任感、ビジネスマナー、コミュニケーション、チームワーク、チャレンジ精神、考える力)(経済産業省、2016)の変化を評価した。質問紙の内容については、環境改善活動に参加する徳島大学およびNPO 担当者へ内容、

質問の主旨の明確さや言葉づかいの正確さなどを確認してもらい、適宜必要な修正を行った。また、環境改善活動実施後、参加者には個別にヒアリング調査を行い、意識の変化について詳細に分析を行った。今回は参加者が少数であることから、統計的解析は不可能であるため、質的な評価を行う。

表 3.16 環境改善活動の概要

実施日	2016 年 10 月 2 日(日)
参加企業	水処理・廃棄物処理プラントメーカー
参加人数	2 名
勤続年数	入社 5 年目以下
環境改善活動内容	1) 浄化活動 2) ボサカゴによる生物観察 3) 干潟調査 4) 畑づくり 5) 葦簀づくり 6) 水質浄化施設説明会 7) 市民との交流会 8) SUP 9) その他

表 3.17, 表 3.18 にアンケート結果を示す。今回参加した 2 名は「水質浄化施設説明会」に参加し関係者から尼崎運河内の水環境や水質浄化施設における水質浄化機構の説明を受けた。また、「市民との交流会」として参加市民との会話をを行った。その結果、企業倫理規範に対する意識の変化として、社員 A は「地域社会に貢献する良き「企業市民」たることを目指す」ことが重要であるとする意識向上がみられた。さらに、社員 A は社会人基礎力における意識の変化として、チャレンジ意欲が向上したと回答した。また、社員 B は、「企業のコンプライアンス遵守」、「環境保全などの社会貢献への意識」について向上が見られた。2 名ともその他の回答からは活動前後で意識の変化はみられなかった。

意識向上が確認された内容について、参加者 2 名にヒアリング調査を行った結果、社員 A は環境改善活動に参加している市民(キャナルガイドの会)との会話を通じて、市民が自主的に参加し活動を継続する姿勢が新しいことへのチャレンジ意欲向上、地域社会への貢献の重要性を再認識したと回答した。また、社員 A は企業向け排水処理装置の設計を業務としていることから、水質浄化施設の説明を受け、機械的な水質浄化のみならず、市民協働活動を含めた水質浄化機構である点に関心を持っていた。さらに、業務の性質上、一般市民と接する機会がなく、環境改善活動に積極的に参加する市民と会話することで、環境保全や社会貢献への関心が高まり、このような活動が地元で行われていれば、積極的に参加したいとの発言もみられた。環境保全や社会貢献への意識の醸成に結びついたと思われるが、一方で尼崎運河における環境改善活動へ積極的に参加したいとの発言はなかった。理由として、自宅から会場までのアクセスに時間を要するためとの回答が得られた。この意見は、今後の活動発展・拡大における重要な課題であり、今後議論すべき点であると考えられる。

次に、社員 B においてヒアリングをした結果、環境保全などの社会貢献への意識が芽生えたとの発言があった。社員 A と同じく、積極的に参加する市民との会話によ



る影響が理由であることがわかった。

表 3.17 企業倫理規範に対する意識の変化および社会人基礎力における意識の変化

	社員 A	社員 B
性別	男性	女性
年令	30 才	32 才
居住地	兵庫県神戸市	兵庫県神戸市
出身地	兵庫県加古川市	兵庫県尼崎市
勤続年数	5 年目	5 年目
職種	設計(企業向け排水処理装置の設計)	事務(庶務, 出勤管理)
参加した環境改善活動内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水質浄化施設説明会</li> <li>・ 市民との交流会</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水質浄化施設説明会</li> <li>・ 市民との交流会</li> </ul>
企業倫理規範における意識の変化が見られた内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地域社会に貢献する良き「企業市民」たることを目指す</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 法令その他の社会的規範を遵守し、公正で健全な企業活動を行う</li> <li>・ 優れた製品・サービスの提供を通じて社会に貢献する</li> <li>・ 地球環境の保全と豊かで住みやすい社会作りに貢献する</li> <li>・ 優れた製品・サービスの提供と安全性について、顧客ニーズの的確な把握する</li> </ul>
社会人基礎力における意識の変化が見られた内容	チャレンジ意欲 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 未経験の仕事や難しい仕事でも「やらせてほしい」と自ら申し出ている</li> <li>・ 新しい仕事に挑戦するため、資格取得や自己啓発などに取り組んでいる</li> </ul>	なし



表 3.18 環境改善活動のアンケート結果  
(網掛けは 2 名の共通回答項目)

	社員 A	社員 B
関心のある環境問題や環境活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 河川や海の汚れ(水質汚濁)</li> <li>・ 大気の汚れ(大気汚染)</li> <li>・ 緑の減少</li> <li>・ 生物の減少(生物多様性の危機)</li> <li>・ 地球の温暖化・ヒートアイランド現象</li> <li>・ 有害化学物質</li> <li>・ ごみ・リサイクル</li> <li>・ 環境教育</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 河川や海の汚れ(水質汚濁)</li> <li>・ 大気の汚れ(大気汚染)</li> <li>・ 緑の減少</li> <li>・ 生物の減少(生物多様性の危機)</li> <li>・ 地球の温暖化・ヒートアイランド現象</li> <li>・ ごみ・リサイクル</li> </ul>
幼少期の自然体験	潮干狩り, 河川の生物観察	川や海での魚釣り, カブトムシ取り
どのような活動に参加しているか, あるいは今後参加したいか.	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 環境保全に関する地域のルールづくり</li> <li>・ ホタルなどの生物を呼び戻す活動</li> <li>・ 花や緑を育てる活動</li> <li>・ 歴史的な遺跡や建物を保全する活動</li> <li>・ 川や海をきれいにする活動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 花や緑を育てる活動</li> </ul>
どのような形態の活動に参加しているか, あるいは参加したいか	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 自治会・町内会や学校などの集まりでの活動</li> <li>・ 環境活動団体や NPO などによる活動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地域の仲間での少人数のグループ活動</li> </ul>
「環境改善活動」いくらまで参加料を払えるか	大人：500 円 子供：300 円	大人：200 円 子供：100 円
「環境改善活動」に参加した後の, 気持ちの変化 ①日常業務の取り組み姿勢 ②社会貢献への意識 ③環境保全への意識	①向上した ②向上した ③向上した	①向上した ②向上した ③向上した

尼崎運河で実施した環境改善活動に参加した企業社員への効果として、環境保全等の環境配慮行動の意識、社会貢献への意識が高まったこと、日常業務に対する取り組み姿勢が向上したことは注目すべき点と考えられる。また、チャレンジ意欲が向上し、資格取得等の自己啓発への意識が高まったことも非常に興味深い点である。この結果は、一概には言えないものの、企業の抱えている課題のコミュニケーション能力の低下、業務へのモチベーション低下といった組織力の弱体化を改善する可能性が示唆された。しかしながら、企業における人材育成の一環としての環境教育の目的は環境に配慮した行動、社会貢献への意識を醸成するための社員育成であるが、その実施が自社の事業活動と関係づけられないという課題が指摘されている(南, 2005)。また、環境教育を推進する上での課題、実施したことによる効果、取り組む意義がわからないといった点も企業からのアンケート結果により明らかとなっている(南, 2005)。このような課題に対し、甲野(2010)は、企業で行われる環境教育の受講に関する効果が環境配慮行動に影響を与えていることを明らかにしており、環境教育を受講した者はしていない者に対し、内発的な要因に影響を与える環境教育により意欲の向上に寄与することを明らかにしている。さらに、甲野(2015)は「組織市民行動」が環境教育の新たな効果の可能性があり、組織風土および組織市民行動と環境配慮行動との関係性があることを明らかにしている。つまりこの結果は、組織内を円滑かつ効率的に運営していくために必要とされる「組織市民行動」を醸成するために環境配慮行動が効果を有することを示している。前述した既往の研究結果を踏まえた上で、尼崎運河の環境改善活動への参加による企業人の人材育成は間接的ではあるが、企業の発展につながる可能性が示唆された。課題として、今回は企業参加者が2名であったことから、今後は参加者人数を増やし活動を行い、その効果を詳細に検証していく必要がある。

全国のNPO・市民団体の喫緊の課題の一つとして、後継者の若者リーダーが参加・育成が出来ていないことも挙げられる。このような社会的課題を解決する有効な手段としても、企業の参画は、企業だけではなく、大学・行政・市民等にとってメリットがあると考えられる。

### 3.4 結言

本章では、生物による物質循環機能と市民協働活動を組み合わせた尼崎運河水質浄化施設(グリーンインフラ)の水質浄化機能における浄化量を定量的に算出し、新たに得られるようになった「生態系サービス」の観点から考察した。さらに、社会創生機能として市民協働活動による水質浄化効果向上のための順応的管理の提案および企業参画の可能性について考察し持続的な効果を明らかにした。機能評価として以下の内容が明らかになった。

#### <水質浄化機能>

- 1) 水質浄化施設全体の水中からの窒素除去率は69%であることがわかった。下水処理施設と比較した場合、本浄化施設の窒素除去率では高度処理施設(窒素除去率:

65~70%)(日本下水道協会, 2001)と同程度の性能であることがわかった。

- 2) 栄養塩回収水路において、流速を1.0cm/sから0.9cm/sに変更することにより藻類繁殖量が約37%増加することがわかった。これにより、藻類取上げ量が増加し、系外除去効果が向上されると期待できる。
- 3) 人工干潟における窒素固定量は単位面積あたり34.22mgN/m<sup>2</sup>/dayであり、これは矢持ら(2003)が実施した大阪南港野鳥園湿地の結果(58~144mgN/m<sup>2</sup>/day)には及ばなかった。
- 4) 藻類回収量が最大となる取上げ実施回数を求めた。2015年と同様の水質状況、藻類繁殖状況であったと仮定した場合、7月~10月に25回の浄化活動を実施することで、81.9 drykgの藻類と1680.4Ngの窒素が取上げできると試算された。これは2015年の水路から回収した藻類による窒素取上げ量の約2倍に相当し、市民協働による栄養塩除去効果の向上が期待できる。

#### <社会創生機能>

- 1) 尼崎運河水質浄化施設が持つ物質循環能力は、順応的維持管理および市民協働活動の活性化によって、当初の3.4倍の能力を持つ事が明らかになり、市民協働活動による水質浄化能力を定量的に評価することができた。
- 2) 人工干潟の順応的管理により、ハゼ類：5ind./m<sup>2</sup>、スジエビモドキ：3ind./m<sup>2</sup>、2015年1月にはヨコエビ類：1012ind./m<sup>2</sup>、多毛類：88ind./m<sup>2</sup>の新規加入生物が確認された。また、コウロエンカワヒバリガイの加入抑制効果として、地盤高変更の要素が強かったことがわかった。植生したヨシによる窒素・炭素固定量を1m<sup>2</sup>あたりに換算した結果、窒素固定量は6.2gN/m<sup>2</sup>、炭素固定量は176.2 gC/m<sup>2</sup>であり、ヨシによる窒素および炭素の固定効果が確認された。
- 3) 市民協働活動に参加した中学生および高校生において、今後の環境活動への参加意欲は、干潟づくり活動の参加者で高い傾向が見受けられた。干潟づくり活動の計画は意見を出しあい、プランを決定した自主検討型活動であり、他の活動はイベント型活動であった。これらの結果より、受動的に関わるイベント型活動よりも能動的に関わる自主検討型活動の方が、今後の活動参加意欲が高まることが示唆された。
- 4) 尼崎運河の生態系サービスは市民協働活動によって充実し、より豊かさを享受することが可能となっていた。新規に始まった活動になるほど地域の特色を活かした内容の活動へと変化していた。また、各活動主体の活動目的が「水質浄化」から「水質浄化を核とした環境まちづくり」へと変化していた。

## ＜参考文献＞

- 青木茂，柳内健，水野佑亮，岡本研，日野明德(2011)：東京湾内湾における人工および天然干潟の二枚貝相とその生態系サービス，日本水産学会誌，77(4)，pp.606-615.
- アサヒビール(2016)：アサヒグループホールディングス株式会社統合報告書 2015，74p.
- 伊藤昭彦，山形与志樹(2015)：生態系サービスの評価：気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消に向けて，日本生態学会誌，65，pp.109-113.
- 大阪湾再生推進会議(2014)：大阪湾再生行動計画(第二期)，30p.
- 太田貴大，林希一郎，伊藤英幸(2012)：生態系サービスの文化サービスに対する主観的価値の決定要因：愛知県一色干潟における精神的療養と環境教育利用に着目して，環境情報科学学術研究論文集，26，pp.307-312.
- 岡田知也，井芹絵里奈，三戸勇吾，高橋俊之，秋山吉寛，渡辺謙太，吉田稔，桑江朝比呂(2015)：干潟域における文化的サービスの定量的評価，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.71，NO.2，pp.838-843.
- 金子是久，押田佳子，松島肇(2012)：海岸砂浜がもたらす生態系サービス—供給・調整・文化的サービスとしての重要性—，景観生態学，17，(1)，pp.19-24.
- 環境省(2012)：生物多様性国家戦略 2012-2020，252p.
- 環境省(2013)：湿地が有する生態系サービスの経済価値評価，66p.
- 環境省(2015)：ESD 環境教育プログラム，<http://www.geoc.jp/esd/column>，2015/5/21 アクセス.
- 環境省(2016)：平成 28 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書，383p.
- 國井大輔(2016)：農業・農村の多面的機能と生態系サービスの定義と評価手法に関する整理，農林水産政策研究，第 25 号，pp.35-55.
- 黒田祥子，山本勲(2014)：企業における従業員のメンタルヘルスの状況と企業業績—企業パネルデータを用いた検証—，RIETI Discussion Paper Series 14-J-021，pp.1-23.
- 経済産業省(2016)：社会人基礎力 <http://www.meti.go.jp/policy/kisoryoku/>，2016/9/10 アクセス.
- 甲野毅(2005)：企業内環境教育の効果と環境配慮行動の促進要因-組織市民行動と組織風土の観点からの考察-，環境情報科学 学術研究論文集，29 巻 pp.297-302.
- 甲野毅(2010)：自然保護グループに属する企業の社員が環境配慮行動を促進する要因に関する研究-企業内環境教育の効果に関する検証を通して-，環境教育，Vol.20-1，pp.92-105.
- 國分秀樹，矢持進(2009)：英虞湾内自然干潟および浚渫土を用いた人工干潟における酸素消費速度と総基礎生産速度の定量的観測，水環境学会誌，Vol.32，No.5，pp.259-266.
- 神戸製鋼所(2016)：神戸製鋼グループ環境・社会報告書 2016，68p.
- 小路淳，堀正和，山下洋(2011)：浅海域の生態系サービス 海の恵みと持続的利用，日本水産学会監修，恒星社厚生閣，150p.
- 佐野晃一，伊藤元己(2014)：生態系サービスの概念を用いた都市住民の環境に対する意識測定，Man-Environment Research Association，第 33 号，pp.1-10.

- 島津明人, 小杉正太郎(1998): 職場不適応発生過程の検討, 心理学研究, 第 69 巻, 第 3 号, pp.198-205.
- 園池公毅(2005): パルス変調クロロフィル蛍光測定におけるデータの解釈, 日本光合成研究会会報, No.42, pp.7-12.
- 園池公毅(2009): クロロフィル蛍光と吸収による光合成測定, 低温科学, Vol.67, pp.507-524.
- 土屋政雄(2012): 労働者における精神障害の有病率と生産性損失, 日本社会精神医学会雑誌, 第 21 巻 4 号, pp.535-540.
- トヨタ自動車(2016): トヨタ自動車社会貢献報告書, 40p.
- 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組み～閘門・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.
- 日本下水道協会(2001): 下水道施設設計指針と解説.
- 藤原靖彦, 旭岡勝義, 高津春雄, 坂井佐千穂(2013): 企業における横断型人材育成の現状と課題, 横幹, 第 3 巻, 第 1 号, pp.36-43.
- 本田裕子(2010): 里山里海の文化と生態系サービスの変遷, 千葉県生物多様性センター研究報告, 第 2 号, pp.39-53.
- 馬奈木俊介(2011): 生物多様性の経済学—経済評価と制度分析, 地球環境戦略研究機関編, 昭和堂, p257.
- 南相眠・千頭聡(2005): 環境教育における企業の果たすべき役割と展望, 日本福祉大学情報社会科学論集, No.8, pp.83-92.
- 三好真千, 上月康則, 三好順也, 山口佳奈子, 宮地由紀, 村上仁士(2007): 大阪湾湾奥でのワカメ育成とその循環的利用に関する実験, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.949-954.
- Millennium Ecosystem Assessment(横浜国立大学 21 世紀 COE 翻訳委員会翻訳) (2007): Ecosystems and Human Well-being General Synthesis(国連ミレニアム エコシステム評価 生態系サービスと人類の将来), オーム社, 241p.
- 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創出に関する現地実験, 海洋開発論文集, Vol.25, 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, Vol.55, pp.1246-1250.
- 山中亮一, 上月康則, 一色圭佑, 森紗綾香, 川井浩史, 石垣衛, 上嶋英機, 高橋秀文(2010): 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.2, pp.1201-1205.
- 山中亮一, 上月康則, 桶川博教, 沢田晃聖, 前田真里, 沓掛安宏, 平井住夫, 一色圭佑(2012): 尼崎運河の藻類を用いた水質改善水路での夜間 LED 照射による効果と適用方法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1166-1170.

- 山中亮一，上月康則，桶川博教，沓掛安宏，一色圭佑，山中健太郎，島巡露澤，中西敬，川井浩史，石垣護，上嶋英機，今中治夫(2013)：尼崎運河での優占二枚貝を活用した水中懸濁物除去手法の開発，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69, No.2, pp.1086-1090.
- 矢持進，柳川竜一，橘美典(2003)：大阪南港野鳥園湿地における物質収支と水質浄化機能の評価，海岸工学論文集，Vol. 50, pp.1241-1245.
- 吉田謙太郎(2013)：生物多様性と生態系サービスの経済学，昭和堂，270p.
- 季勁松(2001)：流動が植物プランクトンに及ぼす影響に関する研究，岡山大学環境理工学部研究報告，第7巻，第1号，pp.45-43.
- 渡辺謙太，桑江朝比呂，三戸勇吾，高橋俊之，大西晃輝，井芹絵里奈，秋山吉寛，吉田稔，鳥羽光晴，岡田知也(2013)：干潟における調整サービスの現況・持続可能性の定量評価，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.71, No. 2, pp.1483-1488.
- Boris Worm, Edward B.Barbier, NicolaBeaumont, J.Emmett Duffy, Carl Folke, Benjamin S.Halpern, Jeremy B.C.Jackson, Heike K.Lotze, Fiorenza Micheli, Stephen R.Palumbi, Enric Sala, Kimberley A.Selkoe, John J.Stachowicz, Reg Watson(2006)：Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services, Science 03 Nov. Vol. 314, Issue 5800, pp. 787-790.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., van den Belt, M.(1997)：The value of the world's ecosystem services and natural capital., Nature, 387 (15), pp.253-260.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, R., *et al.*(2014)：Changes in the global value of ecosystem services, Global Environmental Change, Vol.26, pp.152-158.
- Fisher B, Turner RK, Morling P(2009)：Defining and classifying ecosystem services for decision making, Ecological Economics, 68, pp.643-653.
- J.C.Goldman, K.R.Tenore, J.H.Ryther, N.Corwin(1974)：Water Research,8,pp.45-54.
- J.H.Steele(1962)：Environmental control of photosynthesis in the sea, Volume7, Issue2, pp.137-150.
- Halpern, B. S., Longo, C., Hardy, D., *et al.*(2012)：An index to assess the health and benefits of the global ocean, Nature, Vol. 488, pp.615-620.
- Per Bolund, Sven Hunhammar(1999)：Ecosystem services in urban areas, Ecological Economics, Volume29, pp.293-301.
- Redfield A.C.,B.H.Ketchum and F.A.Richards(1963)：The influence of organisms on the composition of sea-water.In:The Sea vol.2,edited by M.N.Hill,Inter Science,New York,pp.26-77.
- TEEB(2010)：The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations, edited by Kumar, P., Earthscan, London and Washington.
- UNEP(2005)：Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being, Synthesis.

- Whitford, L. A. and G. J. Schumacher(1961) : Effects of current on mineral uptake and respiration by a freshwater alga. *Limnol.Oceanogr.*, 6, pp.423-425.
- Y. Okumura and T. Higuchi(2011) : Cost of Depression Among Adults in Japan, *Prim Care Companion CNS Disord*, 13(3).[http://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/H26/h26/html/b3\\_5\\_3\\_1.html](http://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/H26/h26/html/b3_5_3_1.html) , 2016/10/03/アクセス.

## 第4章 結 論

本研究では、グリーンインフラとしての尼崎運河水質浄化施設から得られる生態系サービスを中心とした、持続可能な社会の創生までを実現する方法と要因を明らかにした。尼崎運河水質浄化施設の環境再生効果の総合的な評価をおこない、市民協働による環境改善活動に参画し、水質浄化機能および協働参加者への効果の定量化を行なった。本研究における概要を新規性、学術性、社会性の観点で以下に示す。

第1章では、研究の背景として、大阪湾における環境改善事業における変遷とこれから求められている技術について述べる。また、研究対象地である尼崎運河における水質環境改善の取り組みについての課題を整理し、本論文の目的を示した。

第2章では、尼崎運河における水環境特性として、親水性を低下させている透明度低下および生物多様性が劣化している要因について明らかにした。水面下-3.0mの密度流として、尼崎港から尼崎運河に流入する水塊の塩分は冬期の方が夏期に比べて高塩分水塊が流入しやすい状況となっていた。エスチュアリー循環の強さは、尼崎運河では水面下-0.5mでは11月に最大となり、水面下-3.0mでは8月が最も強くなることがわかった。尼崎運河の塩分の規定要因としては、事業所からの排水、降雨、エスチュアリー循環が挙げられることがわかった。本運河において、春期と夏期に発生した植物プランクトンのブルームにより、それらが枯死・沈降し、分解される過程で大量のDOが消費されることで底層における貧酸素化を引き起こす要因になっていると考えられた。本運河の水温・塩分・栄養塩濃度などの環境条件が*S.costatum*の増殖に適しており水中の透明度低下を招いていることが明らかとなった。本運河における一次生産量を測定した結果、 $0.45 \sim 7.89 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ の値であった。大阪湾の一次生産量は $0.44 \sim 2.29 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ (日本水産資源保護協会, 2002)であり、本運河における一次生産量が非常に高いことがわかった。春期から夏期にかけ表層での純生産量は $20 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$ であり、呼吸量を大幅に超えた高い生産量を示した。秋期には純生産量が呼吸量を下回り、低下したものの、冬期には再び $14 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$ の純生産量を示した。これは夏期の尼崎港で測定された結果を上回っており、尼崎運河内における一次生産量の高さが明らかとなった。また、他の海域と異なり、冬季において純生産量が高いことも本運河の特徴であることがわかった。運河内DO消費フラックスは $1.97 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ と算出された。遠藤ら(2008)が行った大阪湾大和川河口域堺泉北港北泊地での測定結果は $2.54 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ であり、同等の酸素消費が確認された。

第3章では、生物による物質循環機能と市民協働活動を組み合わせた尼崎運河水質浄化施設の水質浄化機能における浄化量を定量的に算出し、新たに得られるようになった「生態系サービス」の観点から考察を行った。さらに、社会創生機能として市民協働活動による水質浄化効果向上のための順応的管理の提案および企業参画の可能性について考察した。



水質浄化施設全体の水中からの窒素除去率は69%であることがわかった。下水処理施設と比較した場合、本浄化施設の窒素除去率では高度処理施設(窒素除去率：65~70%)(日本下水道協会，2001)と同程度の性能であることがわかった。栄養塩回収水路において、流速を1.0cm/sから0.9cm/sに変更することにより藻類繁茂量が約37%増加することがわかった。これにより、藻類取上げ量が増加し、系外除去効果の向上が期待できることがわかった。

藻類回収量が最大となる取上げ実施回数として、2015年と同様の水質状況、藻類繁茂状況であったと仮定した場合、7月~10月に25回の浄化活動を実施することで、81.9 drykgの藻類と1680.4Ngの窒素が取上げできると試算された。これは2015年の水路から回収した藻類による窒素取上げ量の約2倍に相当し、市民協働による栄養塩除去効果の向上が期待できることがわかった。尼崎運河水質浄化施設が持つ物質循環能力は、順応的維持管理および市民協働活動の活性化によって、当初の3.4倍の能力を持つ事が明らかになり、市民協働活動による水質浄化能力を定量的に評価することができた。人工干潟の順応的管理により、ハゼ類：5ind./m<sup>2</sup>，スジエビモドキ：3ind./m<sup>2</sup>，ヨコエビ類：1012ind./m<sup>2</sup>，多毛類：88ind./m<sup>2</sup>の新規加入生物が確認できた。また、コウロエンカワヒバリガイの加入抑制効果として、地盤高変更が影響していることがわかった。市民協働活動に参加した中学生および高校生において、今後の環境活動への参加意欲は、干潟づくり活動の参加者で高い傾向が得られた。干潟づくり活動の計画は意見を出しあい、プランを決定する自主検討型活動であり、受動的に関わるイベント型活動よりも能動的に関わる自主検討型活動の方が、今後の活動参加意欲が高まることが示唆された。尼崎運河の生態系サービスは市民協働活動によって充実し、より豊かさを享受することが可能となっていた。新規に始まった活動になるほど地域の特色を活かした内容の活動へと変化しており、各活動主体の活動目的が「水質浄化」から「水質浄化を核とした環境まちづくり」へと変化していくことが明らかとなった。

現在の市民協働活動においても持続的な発展のための組織づくりの途中である。持続可能な社会を構築していくためには、行政、大学、市民に加え、企業など多種多様な主体が参画することが不可欠である。

グリーンインフラとしての尼崎運河水質浄化施設は、竣工以降、産・官・学・民の各主体による市民協働活動の取り組みが活発になり、その活動規模や範囲は徐々に拡大し始めている。活動が活発になることで順応的維持管理や水質浄化に対するニーズの高まりや、それらの活性化も期待できることが明らかとなった。

最後に、本研究がグリーンインフラの持続的活用がされている場所での、新しい生態系サービスの成り立ちを示し、グリーンインフラ整備の際の一助となることを期待する。さらに発展、向上することで、豊かな生態系を育む海から多くの生態系サービスを持続的に享受できる、真に豊かな水環境を創出し、皆が幸福になるための一助になれば幸甚である。

## 謝 辞

本論文は、著者が徳島大学大学院先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース 環境衛生工学研究室在学中に、上月康則教授、山中亮一講師のご指導のもとで行った研究成果をまとめたものであります。著者は尼崎運河における環境改善の研究に平成 21 年徳島大学工学部建設工学科環境衛生工学研究室に配属されてから 9 年間携わりました。その間に多くの方々のお世話になり、ご支援とご助力を賜りましたこと深く感謝を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、ご指導とご鞭撻を賜りました徳島大学大学院教授 上月康則博士に深く感謝の意を表します。著者が社会人学生として仕事と学業の両立で苦悩しているときも、温かくときに厳しい言葉で励ましをいただき、何とか博士論文をまとめることができました。米国ボルチモアでの国際学会で博士後期課程への進学をお誘いいただいたことは今でも忘れられない良き思い出です。このような貴重な機会を与えていただいたことに心より感謝を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、研究の遂行から論文執筆に亘り、終始一貫して、懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました徳島大学大学院講師 山中亮一博士に深く感謝の意を表します。学部生時代から毎月朝 6 時に山中先生の自動車で尼崎運河まで調査に通ったのは良き思い出です。また、研究内容のみならず、社会人としてのマネジメント力、思考力、イノベーション力を磨くスキルもご教授いただきました。厚くお礼を申し上げます。

本論文の審査を通じて、徳島大学大学院教授 近藤光男博士には、貴重なご助言とご指導をいただきました。深甚なる感謝の意を表します。

徳島大学大学院教授 鎌田磨人博士には本論文の審査および内容における不備な事項について適切なご指導を賜りました。深甚なる感謝の意を表します。

著者の社会人博士課程への進学に際し、株式会社神鋼環境ソリューション 水環境技術本部上下水技術部 松岡俊憲部長には、社会人博士課程への進学を推薦していただきました。このような機会を与えていただき、心より感謝を申し上げます。

広島工業大学教授 上嶋英機博士、広島工業大学准教授 石垣衛博士、神戸大学教授 川井浩史博士、尼崎まるまるクラブ 中西敬博士、兵庫県県土整備部、尼崎港管理事務所および尼崎市役所の皆様には、本研究を行う機会を与えていただきました。甚大なる感謝の意を表します。尼崎市立南武庫之荘中学校教頭 中岡禎雄氏、尼崎まるまるクラブの生徒一同、キャナルガイドの会および NPO 法人尼崎 21 世紀の森の皆様には研究を進めるにあたり藻類の回収活動および堆肥化にご協力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

NPO 法人人と自然と町づくりと 森紗綾香博士には学部生時代よりともに本研究を進めてきました。後輩に対し丁寧に指導される姿は良き先輩の手本であり、小生も見習うことが多くありました。ここに深く感謝の意を表します。日建工学株式会社 大熊康平氏には研究におけるサポートに尽力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

大阪府立大学工業高等専門学校准教授 大谷壮介博士，一般社団法人地域資源研究センター 三好順也博士，和歌山大学助教 田代優秋博士，徳島文理大学助教 三好真千博士，徳島大学・美波町地域づくりセンター 井若和久博士，阿南工業高等専門学校 東和之博士，島根大学大学院助教 管原庄吾博士，NPO 法人人と自然と町づくりと 平井研氏，株式会社エコー 山口奈津美氏，株式会社フジタ建設コンサルタント 岩雲貴俊氏には調査・実験・分析・考察に関する貴重なご助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

環境システム株式会社 鮎川和泰氏には本研究を進めるにあたり調査にご協力いただきました。ここに甚大なる感謝の意を表します。

また，本研究は多くの先輩，後輩諸氏とともに現地調査，実験，考察を積み重ねてきた成果であります。いであ株式会社 森友佑氏，徳島市役所 板東伸益氏，株式会社安藤・間 足立雅人氏，日亜化学工業株式会社 田邊一也氏，神戸市役所 柴田雄輝氏，徳島市役所 前田真里氏，株式会社基礎建設コンサルタント 桶川博教氏，徳島市役所 沢田晃聖氏，株式会社 IHI インフラ建設 沓掛安宏氏，附家書店 島巡露濤氏，株式会社浅川組 山中健太郎氏，株式会社四電技術コンサルタント 中川卓弥氏，阿南市役所 角元陽一氏，中央復建コンサルタント株式会社 松原加奈子氏には，研究の遂行にあたりご協力いただきました。ここに特別な謝意を表します。

本研究の遂行にあたり，徳島大学大学院博士後期課程 松重摩耶氏，博士前期課程 鶴江智彦氏，徳島大学 上田敦史氏，瀧口裕己氏，その他にも環境衛生工学研究室に在籍する学生諸氏に多くのご協力をいただきました。ここに深くお礼を申し上げます。

最後に，これまでの活動に声援を送っていただいた尊敬する両親，祖父母，弟，親戚一同，友人たちに深く感謝します。