

過栄養域の尼崎運河における 浮遊生態系の炭素フローの特性

大谷 壮介¹・上月 康則²・藤嶋 康平³・田中 駿佑⁴
湯浅 翔太⁴・中井 喬也⁴・山中 亮一⁵

¹正会員 大阪府立大学工業高等専門学校准教授(〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町26-12)

E-mail:otani@osaka-pct.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 徳島大学環境防災研究センター教授(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

³学生会員 大阪府立大学工業高等専門学校専攻科(〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町26-12)

⁴大阪府立大学工業高等専門学校本科(〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町26-12)

⁵正会員 徳島大学環境防災研究センター講師(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

本研究では、大阪湾湾奥に位置する尼崎運河における植物プランクトン、動物プランクトンおよびコウロエンカワヒバリガイの現存量・生産速度を定量化することで、一次生産者から二次生産者へ至る年間の炭素フローを算出し、転送効率について評価した。植物プランクトンによる一次生産速度は他の水域に比べて高く、動物プランクトンの個体数、二次生産速度は低かった。年間を通して、植物プランクトンから動物プランクトン、コウロエンカワヒバリガイの転送効率はそれぞれ0.76%、7.8%であり、合わせて8.6%の有機炭素が二次生産者へ移行していた。運河ではコウロエンカワヒバリガイは効率よく成長して炭素を固定しているが、動物プランクトンは食物連鎖において魚類の現存量・生産速度に影響していることが示唆された。

Key Words : Primary production, Secondary production, *Xenostrobus securus*, Transfer efficiency, Canal

1. 結論

尼崎運河はわが国を代表する都市運河のひとつであるが、海水交換も乏しく、過栄養な状態であり、慢性的な高濁度、貧酸素状態にあるため、生物多様性は低い状態にある。そこで、水質改善のために藻類による栄養塩の除去¹⁾、二枚貝による懸濁物質の除去手法の開発²⁾、魚類の生息場の創出³⁾等の環境改善に関する研究が実施されてきた。特に、底生魚であるチチブの生息環境に関して、DOや塩分や基質等の検討が現地調査³⁾および室内実験⁴⁾で行われている。このように、水質改善や魚類の生息環境に関する研究が実施されている。

一方、都市運河は海水交換が悪く、過栄養化域であるがゆえに一次生産性が高く、植物プランクトン量は豊富である。したがって、一次生産者である植物プランクトンを餌とする捕食者にとって、運河は餌資源が豊富にある状態と考えられるが、低次生態系の動態や、基礎生産からの上位の捕食者への物質の流れである転送効率について試算された例はほとんど無く、各栄養段階における生産者や消費者の現存量や生産速度についても不明である。

そこで、本研究では炭素固定機能の解明に繋がる、植物プランクトンを起点とした生物生産の炭素フローに着目

した生態系構造の特性を明らかにすることを目的とした。特に、過栄養域である尼崎運河において植物プランクトンから高次の捕食者である動物プランクトンと運河壁面に優占して付着しているコウロエンカワヒバリガイへの炭素フローに着目して、一次生産者および二次生産者の現存量と各生産速度から転送効率を算出した。

2. 研究方法

(1) 調査地域

調査は2019年6月から2020年6月まで兵庫県尼崎市に位置する北堀運河を対象に毎月1回の調査を行った(図-1)。調査を実施した北堀運河の水深は約3m程度であり、運河の水量は水門や閘門により水位管理されている。そのため、海水交換は制限されており、運河内の平均流速は数cm/s以下とほとんど流れが無い環境である⁵⁾。

(2) 植物プランクトンの現存量と生産速度の測定方法

現場において表層、表層から1.5m、2.5mの水深の水試料を採水した。各水深のChl_a濃度は採水した水試料をガラス繊維ろ紙GF/Cを用いてろ過を実施して、DMFによってChl_aを抽出した。その後、分光光度計(島津製作

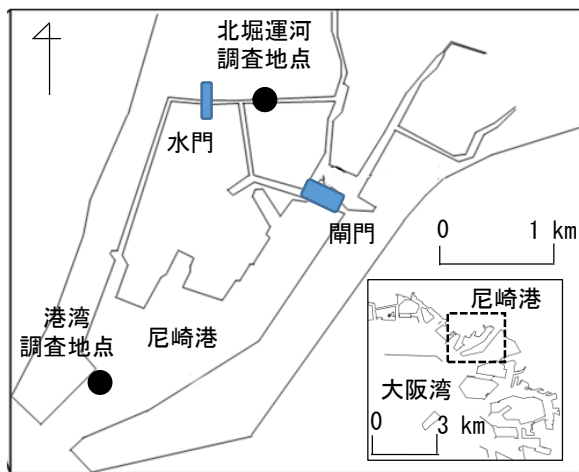


図-1 調査地点

所社, UVmini-1240)により吸光度を測定して, Chl a 濃度を算出した. 植物プランクトンの現存量は, 十分な栄養塩があり, 植物プランクトン群集は高い生理活性を保っているとしたC/Chl a 比=30⁹⁾を用いてChl a 濃度から炭素濃度に換算して, 水柱当たりの植物プランクトンの現存量(mgC/m²)を算出した.

水中の植物プランクトンの光合成速度の測定は, 明瓶法を用いて行った. 採水した水試料を目合いが100 μ mのふるいを通すことで動物プランクトンを除去して, 試料はそれぞれを100 mlのフラン瓶(n=5)に移し, 溶存酸素計(HACK社,HQ40d)を用いて溶存酸素(DO)を測定した. その後, フラン瓶を採水水深に設置して約3時間の培養を行った. 光合成速度は培養後のDOから培養前のDOとの差を培養時間で除して算定し, 測定によって得られた値を純光合成速度として, 呼吸商を用いて炭素換算を行った. さらに, 日照時間は8時間と仮定して, 水柱当たりの一次生産速度(mgC/m²/day)を算出した.

(3) 動物プランクトンの現存量と生産速度の測定・解析方法

現場において Φ 20 cmのプランクトンネット(目合い: 100 μ m)を水底から表層まで鉛直曳きをして, 動物プランクトンの採集を行って種組成および個体数を算出した. なお, 動物プランクトンの調査に関しては港湾域(図-1)においても実施して運河と比較を行った.

動物プランクトンの現存量は, 各種の長さや炭素量の関係⁷⁾を用いて, 各種の体積を計算し, 炭素量変換したものを現存量とした. さらに現存量に現場で測定した水温, 各種の成長速度を乗じて積算することで二次生産速度を求めた⁹⁾. なお, 本研究では繊毛虫類等の微小動物プランクトンとカイアシ類等を合わせて動物プランクトンの二次生産速度として算出した.

(4) コウロエンカワヒバリガイの現存量と生産速度の

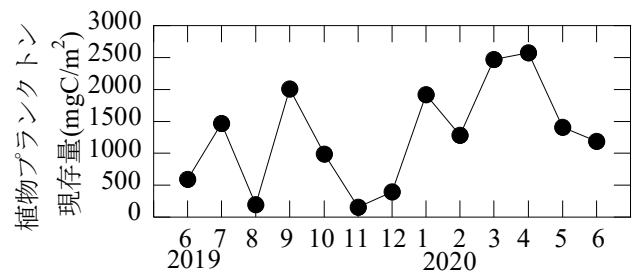


図-2 植物プランクトンの現存量

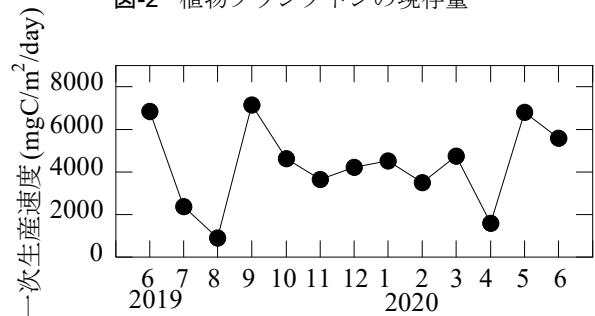


図-3 植物プランクトンの一次生産速度

測定・解析方法

尼崎運河の水質浄化施設壁面に付着しているコウロエンカワヒバリガイの採集を行った. 調査はイガイ取り器を用いて, 横30 cm, 縦10 cmに生息しているコウロエンカワヒバリガイを採集して個体数と殻長を計測した. 得られたデータよりコホート解析を実施して, 成長量逐次計算法によって二次生産速度を算出した.

3. 結果

(1) 植物プランクトンの現存量と一次生産速度

植物プランクトンの現存量を図-2に示す. 表層のChl a 濃度は 3.1-39.8 μ g/L, 水柱当たりの植物プランクトンの炭素現存量は 160-2569 mgC/m²であり, 初春に高い傾向にあった. 植物プランクトンの一次生産速度を図-3に示す. 一次生産速度は 909-7145 mgC/m²/dayで変動した.

(2) 動物プランクトンの現存量と生産速度

動物プランクトンの種数と個体数を図-4に示す. 北堀運河における動物プランクトンの種数は6-24種, 個体数は1.04-89.3 ind/L, 港湾における種数は8-28種, 個体数は3.5-94.5 ind/Lであった. 港湾の種数は北堀運河より年間を通して常に高く, 年間平均で約1.7倍の種が出現していた. 北堀運河の個体数は2019年8月に急激に増加しているが, それ以降の個体数は年間を通して低い水準で変動しており, 2020年5月と6月に再び増加していた. また, 港湾の個体数は大きく変動しているが, 北堀運河よりも高い傾向にあった.

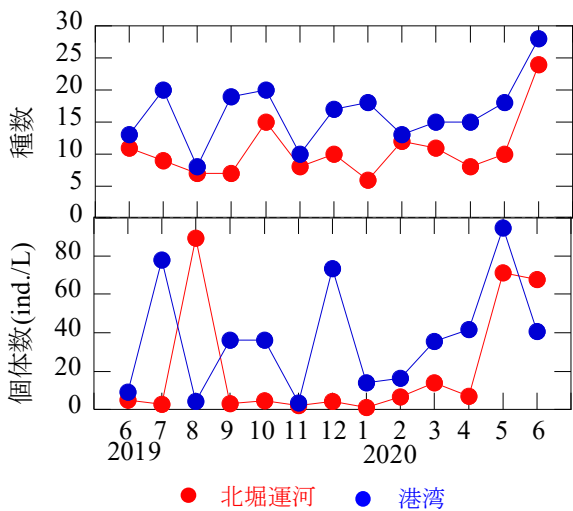


図-4 動物プランクトンの種数と個体数

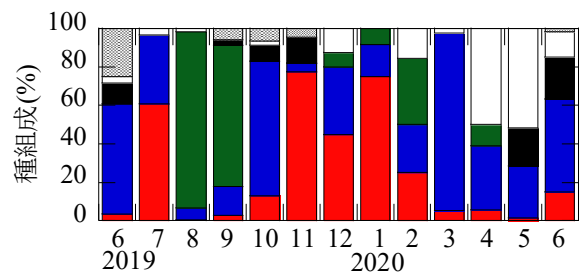
動物プランクトンの種組成を図-5に示す。北堀運河の動物プランクトンの種組成について、全体的に繊毛虫類と節足動物門のカイアシ類の割合が高いが、明瞭な季節変化はなく、輪形動物門のツボワムシ科*Brachiomus plicatilis*が8、9月、環形動物門が4、5月に大きく増加していた。特に、2019年8月の個体数は*B. plicatilis*の出現に大きく影響されていた。一方で、港湾の動物プランクトンの種組成について繊毛虫類と節足動物門のカイアシ類の割合が約70%を占めていた。このように汽水域である運河の動物プランクトンの種組成は港湾と異なっており、種数、個体数ともに港湾域より少ない傾向にあった。

運河の動物プランクトンの現存量、二次生産速度を図-6、図-7に示す。水柱あたりの動物プランクトンの現存量は4.2 – 387 mgC/m²、二次生産速度は1.3 – 112 mgC/m²/dayで変動した。

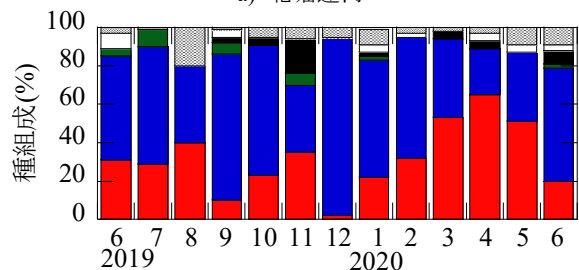
(3) コウロエンカワヒバリガイの現存量と生産速度

コウロエンカワヒバリガイの成長曲線を図-8に示す。コウロエンカワヒバリガイは1つから3つのコホートが存在しており、11月まで順調に成長した後に、3つの全てのコホートが消滅していた。これはコウロエンカワヒバリガイが、11月に壁面から脱落したためと推察される。一方、12月には新たな個体群が加入しており、5 mm程度の新規加入個体群が確認できる。その後、3月までの成長は小さいが4月以降は大きく成長することが伺える。

コウロエンカワヒバリガイの現存量、二次生産速度を図-9、図-10に示す。コウロエンの個体群密度は6,000 – 27,933 ind./m²、現存量は6.2 – 93.3 gC/m²であり、コホートが1つの時の12 – 4月の期間の現存量は小さかった。二次生産速度について、壁面より脱落したことにより、11月の生産速度は負の値を示しているが、その他の月の生産速度は正の値を示しており、-856 – 1,378 mgC/m²/dayで変



a) 北堀運河



b) 港湾

その他
 環形動物門
 軟体動物門
 輪形動物門
 節足動物門
 繊毛虫門

図-5 動物プランクトンの種組成

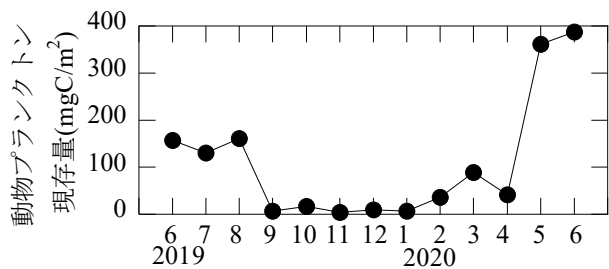


図-6 動物プランクトンの現存量

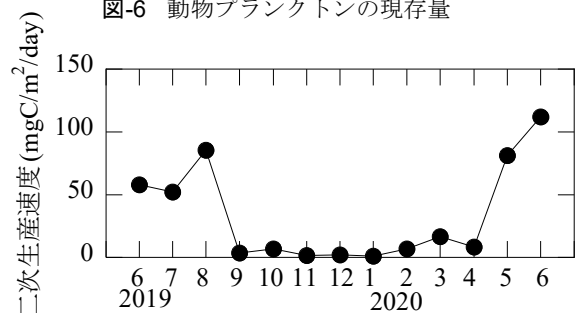


図-7 動物プランクトンの二次生産速度

動した。

(4) 転送効率

年間を通じた低次生態系の現存量、生産速度および転送効率を図-11に示す。年間を通して植物プランクトンによる一次生産から動物プランクトン、コウロエンカワヒバリガイへの転送効率はそれぞれ 0.76%、7.8%であり、合わせて 8.6%の生産が高次の捕食者へ移行していた。特に植物プランクトンからコウロエンカワヒバリガイの転送効率は動物プランクトンの10.2倍であった。

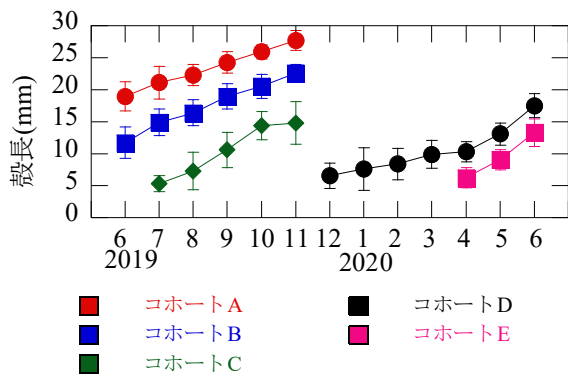


図-8 コウロエンカワヒバリガイの成長曲線

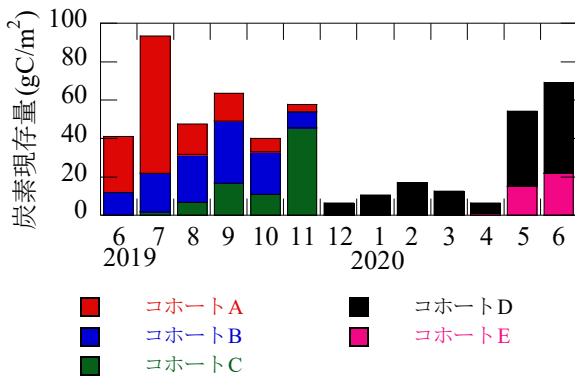


図-9 コウロエンカワヒバリガイの現存量

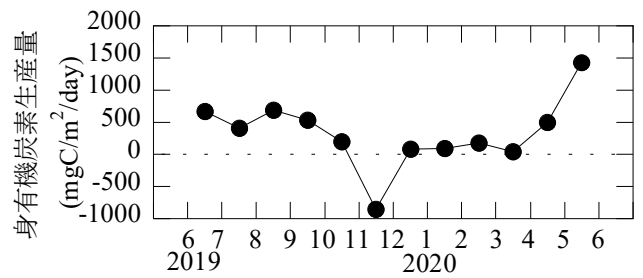


図-10 コウロエンカワヒバリガイの二次生産速度

と同程度、1970年代の大阪湾¹¹⁾の約1/6であった。大阪府の海域の水生生物調査の平成31年度の大阪湾の海域の15地点の動物プランクトンのモニタリング調査では、年間を通して種数は3-16種、個体数は30-49,270 ind/Lが報告されている¹⁵⁾。尼崎運河の動物プランクトンの種数は大阪湾沿岸部より多い傾向にあるが、個体数は年間を通して100 ind/L以下であり、大阪湾沿岸部の平均個体数に比べて2桁ほど小さかった。また、京浜運河における動物プランクトンの個体数は8月において、1,540 ind/L、10月において1,590 ind/Lと報告されており¹⁶⁾、尼崎運河の動物プランクトンの個体数は少ないことを示している。運河という特有な環境で動物プランクトンの種組成は海域とは異なっており(図-5)、港湾域より運河域の方が動物プランクトンの種数・個体数は少なく(図-4)、各種の大きさや成長速度の違いが生産速度に寄与していることが推察される。

転送効率は大阪湾や広島湾北部と同様の値であり、広島湾北部の転送効率は養殖カキの二次生産速度が含まれている。瀬戸内海や関西国際空港周辺の転送効率は高く、尼崎運河の転送効率は低い水域であった。一般的な海洋生態系における転送効率は10-20%程度であり¹⁷⁾、転送効率が水域の栄養条件と逆相関を示す傾向があることが示されている¹⁸⁾¹⁹⁾。これらのことは転送効率が低く、一次生産速度が著しく高い尼崎運河は過栄養域であることを反映しているものと考えられる。つまり、尼崎運河の転送効率は低いが、一次生産速度は他の水域よりも高く、その結果として低い転送効率が見積られたものと考えら

4. 考察

(1) 生産速度と転送効率の他の水域との比較

本研究の一次生産速度、二次生産速度、転送効率について他の研究事例との比較を行った(表-1)。尼崎運河の年間を通した一次生産速度は4,146 mgC/m²/dayと他の海域よりも高かった。1970年代の大阪湾の一次生産速度は2,150 mgC/m²/day¹¹⁾、1993-1994年の大阪湾北部の一次生産速度は1,227 mgC/m²/day¹⁴⁾と報告されており、本運河の一次生産速度は各時代の大阪湾の約2倍、約3.4倍であった。動物プランクトンの二次生産速度は広島湾北部¹³⁾

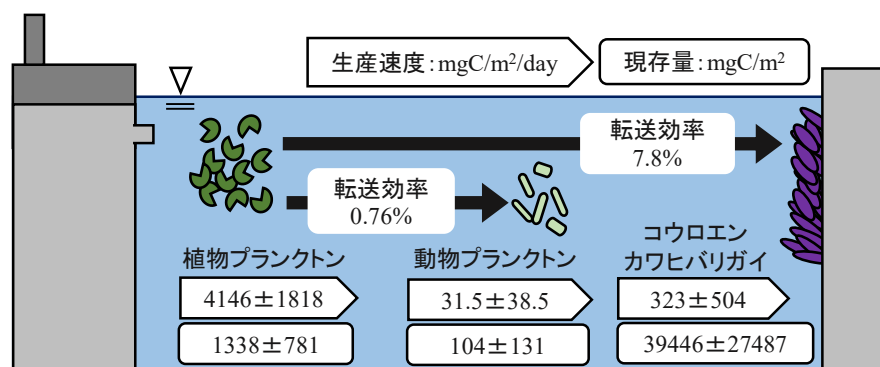


図-11 年間を通した低次生態系の現存量、生産速度(平均値±標準偏差)および転送効率

表-1 一次生産速度、二次生産速度(mgC/m²/day), 転送効率(%)の比較

*: 面積を考慮して転送効率を算出

調査地点	植物プランクトン 一次生産速度	動物プランクトン 二次生産速度	二枚貝 二次生産速度	転送効率	参考文献
本研究	4146	31.5	323	8.6	本研究
瀬戸内海	781	220.9	-	28	10)
大阪湾	2150	181	-	8.4	11)
関西国際空港周辺	1507	408	-	27	12)
広島湾北部	530	39.4	20	9.4*	13)
広島湾南部	310	48.8	8	16.7*	13)

れる。さらに、これらのことは、植物プランクトンの一次生産速度が高ければ、上位の捕食者の生産速度が高くなるわけではなく、現存量を含めた食物連鎖のバランスが重要であることが示唆される。

(2) 食物連鎖を通じた炭素フロー

本調査地において生物の安定同位体比による食物網の解析が行われており、スズキを頂点に浮遊系の食物連鎖において少なくとも3段階の栄養段階が示されている²⁰⁾。本研究より、運河においては動物プランクトンの現存量および生産速度が低かったことから、植物プランクトンと魚類の食物連鎖を繋ぐ仲介者の機能が健全に働いていないことが考えられる。特に植物プランクトンから動物プランクトンへの転送効率が1%以下であったことは(図-11)、植物プランクトンから高次の生物に生産が移行していないために、動物プランクトンを餌とする魚類の現存量や生産速度へ影響していることが示唆される。実際に北堀運河における魚類の採捕調査では運河は矢板で覆われており、生息環境が劣悪であることに加えて、底層は貧酸素化により魚類はほとんど採捕されなく、表層においても数種の採捕であり、魚類の多様性も低かった²¹⁾。

また、コウロエンカワヒバリガイは植物プランクトンを餌として、摂餌・同化して自身の生産に利用して順調に成長していることが伺える(図-8)。本水域における夏季のコウロエンカワヒバリガイの個体群は1日あたり摂餌した窒素の約35%を同化しており²⁾、水中の懸濁物の除去に貢献しているという報告がある。また、コウロエンカワヒバリガイの生産速度は植物プランクトンの約1/12であるが、現存量は約29倍であることから身として有機炭素を固定していた(図-9)。一方、コウロエンカワヒバリの個体群は11月に壁面より脱落している(図-8)。このことは、脱落することで蓄積した有機物が海底への負荷となっていることが推察される。また、高い生産速度を有している植物プランクトンは消費されずに、沈降・堆積することで底質悪化が助長されていると推察さ

れる。

これらのことから尼崎運河における食物連鎖を通じた炭素フローにおいて、コウロエンカワヒバリガイは効率よく炭素を固定しているが、動物プランクトンは現存量が小さく、生産速度が低いため、高次の捕食者である魚類の現存量と生産速度に影響していることが示唆された。

5. 結論

本研究では、尼崎運河において一次生産者と二次生産者の現存量・生産速度を定量化して、転送効率を算出することで炭素フローの特性を明らかにすることを目的に調査を行った。以下の得られた結論を示す。

- 1) 尼崎運河における年間を通じた植物プランクトンの一次生産速度は 4,146 mgC/m²/day、二次生産速度について動物プランクトンは 31.5 mgC/m²/day、コウロエンカワヒバリガイは 323 mgC/m²/day であった。
- 2) 植物プランクトンの一次生産から動物プランクトン、コウロエンカワヒバリガイへの転送効率はそれぞれ 0.76%、7.8%であり、合わせて 8.6%の有機炭素が二次生産者へ移行して、コウロエンカワヒバリガイは成長することで炭素を固定していた。
- 3) 植物プランクトンから動物プランクトンへの炭素フローは小さいことから、食物連鎖において、魚類の現存量と生産速度に影響をしていることが示唆された。

謝辞: 本研究の遂行の際に、兵庫県阪神南県民センター 尼崎港管理事務所ならびに尼崎運河〇〇(まるまる)クラブのご支援・ご助力を賜った。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 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: 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, 2010.
- 2) 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, 島巡露瀟, 中西敬, 川井浩史, 石垣衛, 上嶋英機, 今中 治夫: 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 B2-71 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_1086-I_1090, 2013.
 - 3) 上月康則, 山中亮一, 岩見和樹, 田辺尚暉, 橋上和生, 戸田涼介, 齋藤稔, 松重摩耶: 尼崎運河でのハゼ科チチブの人工魚礁創出実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 76, No. 2, pp. I_768-I_773, 2020.
 - 4) 上月康則, 平川倫, 竹山佳奈, 松重摩耶, 西上広貴, 岩見和樹, 山中亮一, 宮本一之: 酸素・塩分勾配水槽を用いたチチブの貧酸素応答に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 73, No. 2, pp. I_839-I_844, 2017.
 - 5) 中西敬, 上月康則, 森紗綾香, 川井浩史, 辻博和, 上嶋英機: 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 卷, pp.757-762, 2007.
 - 6) Strickland, J. D. H.: Measuring the production of marine phytoplankton, *Bull. Fisheries Res. Board Can.*, 122: 1-172, 1960.
 - 7) Uye, S.: Length-weight relationships of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 38, 149-158, 1982.
 - 8) Uye, S., Nagao, N., Tamaki, H.: Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr.* 52, 689-703, 1986.
 - 9) Uye, S., Shimazu, T.: Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of meso- and macrozooplankton in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr.* 53, 529-538, 1997.
 - 10) 上真一: 瀬戸内海の低次生産過程ープランクトンから漁業生産へー, 日本海水学会誌, 第 53 卷, 第 4 号, pp. 241-247, 1999.
 - 11) 城久, 宇野史郎: 大阪湾における動物プランクトンの現存量とそれから見積もられる生産量, 日本プランクトン学会報, 第 30 卷, 第 1 号, pp.41-51, 1983.
 - 12) 矢持進, 米田佳弘, 古澤昭人, 大塚正純, 二宮早由子: 関西国際空港島地先海域の生物生産構造, 海岸工学論文集, 47, pp. 1191-1195, 2000.
 - 13) Umehara A., Asaoka S., Fujii N., Otani S., Yamamoto H., Nakai S., Okuda T., Nishijima W.: Biological productivity at lower trophic levels with intensive oyster farming in Hiroshima Bay, Japan. *Aquaculture*, 495, 311-319, 2018.
 - 14) 橋本俊也, 山本民次, 多田邦尚, 松田治, 永末寿宏: 瀬戸内海の一次生産と海洋構造, 沿岸海洋研究, 第 35 卷, 第 1 号, pp.109-114, 1997.
 - 15) 大阪府: 海域の水生生物調査結果, http://www.pref.osaka.lg.jp/kankyo/hozen/osaka-wan/sea_seibutu.html 参照 2021-05-20.
 - 16) 松川康夫, 下田徹: 京浜運河のプランクトン群集に対する発電用冷却水取排水の影響, 中央水研研報, 第 11 号, pp.1-21, 1998.
 - 17) Ryther J.H.: Photosynthesis and Fish Production in the Sea, *Science*, 166, 72-76, 1969.
 - 18) Blackburn, M.: Regressions between biological oceanographic measurements in the eastern tropical pacific and their significance to ecological efficiency, *Limnology and Oceanography*, 18, 552-563, 1973
 - 19) Taniguchi, A.: Phytoplankton-zooplankton relationships in the western pacific ocean and adjacent seas, *Marine Biology*, 21, 115-121, 1973.
 - 20) 上月康則, 山中亮一, 岩見和樹, 森田海斗, 大谷壮介, 橋上和生, 田辺尚暉, 齋藤稔 (2020): チチブの栄養段階に着目した尼崎運河の環境改善方法に関する提案, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 76, No. 6, pp. II-121-II-127.
 - 21) 上村了美, 大谷壮介, 岩見和樹, 上月康則, 田辺尚暉, 山中亮一: 大阪湾奥における魚類多様性検出のための環境 DNA 調査, 土木学会論文集 B2-75 (海岸工学), Vol. 75, No.2, pp. I_1171-I_1176, 2019.

(Received March 17, 2021)

(Accepted July 22, 2021)

CHARACTERISTICS OF CARBON FLOW ON PELAGIC ECOSYSTEMS AT HYPERNUTRIENT AREA IN AMAGASAKI CANAL

Sosuke OTANI, Yasunori KOZUKI, Kohei FUJISHIMA, Syunsuke TANAKA,
Shota YUASA, Takaya NAKAI and Ryoichi YAMANAKA

The purpose of this study was to reveal the carbon flow from primary producer (phytoplankton) to secondary producers (zooplankton and *Xenostrobus securis*), transfer efficiency at hyper-nutrient area in the Amagasaki Canal of inner part of Osaka Bay. The primary production rate was higher than that of other water area, while zooplankton biomass and secondary production rate were lower. The production rate of *X. securis* was about 1/12 of that of phytoplankton, but biomass was about 29 times higher. Transfer efficiency from phytoplankton to zooplankton and *X. securis* was 0.76% and 7.8%, respectively. These results suggested that *X. securis* grew efficiently and fixed organic carbon, zooplankton were not functioning properly as intermediaries in the food chain between phytoplankton and fishes.