

<報 文>

二枚貝を利用した諫早湾干拓調整池の水質改善の検討*

—淡水性二枚貝3種の浄化能力について—

桑岡莉帆**・粕谷智之**

キーワード ①諫早湾 ②二枚貝 ③水質浄化

要 旨

淡水性二枚貝類3種（イケチョウガイ、ニセマツカサガイ、マシジミ）の摂餌実験を行い、浄化能力を検討した。水温28℃における単位湿重量当たりの濾水速度（FR）および化学的酸素要求量（COD）除去量は、2.1～66 L/kgWW/hおよび4.2～28 mg/kgWW/hの範囲であり、マシジミで最も高く、イケチョウガイで低かった。水温28℃におけるCOD除去量と、水温に対するFRの応答を用いて、二枚貝3種の年間のCOD除去量を算出した。試算されたCOD除去量は、1日当たり0.02～580 kgであり、これは下水処理場の0.00002～0.66ヶ所分、貨幣価値にして130万～360億円に相当する。イケチョウガイは1年以上飼育すれば、貨幣価値が個体の購入費用を上回る。ニセマツカサガイとマシジミは周辺水路に自然繁殖している個体を利用すればイケチョウガイのような個体の購入費用がかからないことから、費用対効果は高いと考えられる。

1. はじめに

諫早湾干拓調整池（以降、調整池）は、平成9年4月、国営諫早湾干拓事業のなかで、潮受け堤防が締め切られたことにより、創出された（図1）。調整池の水質は、水質保全目標値を超過している状態が続いているが¹⁾、「第2期諫早湾干拓調整池水辺環境の保全と創造のための行動計画」に基づき、様々な水質改善に取り組んだ結果、改善効果は見られたものの、植物プランクトンなどの内部生産に起因する負荷は増加した¹⁾。

長崎県環境保健研究センター（以降、環保研センター）では、平成18年度から植物プランクトンを餌とする二枚貝を増やすことにより、陸域と水域の間の物質循環を強化し、水環境の改善に繋げる手法の開発に取り組んでいる。これまでにヤマトシジミ（*Corbicula japonica*）やイケチョウガイ（*Hyriopsis schlegelii*）などを用いて調整池や遊水池における成長・生残を調査し、飼育適性について検討された²⁻⁸⁾。そこで、本研究では、次のステップとして、調整池で飼育できる可能性があるイケチョウガイ、ニセマツカサガイ（*Inversium yanagawensis*）、そしてマシジミ（*Corbicula leana*）の淡水性二枚貝3種（図2）を対象として摂餌実験を行い、摂餌特性を明らかにするとともに化学的酸素要求量（以降、COD）の除去量を検討した。

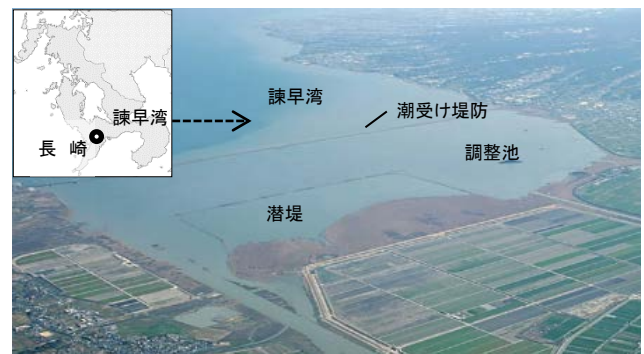


図1 諫早湾干拓調整池

2. 材料および方法

2.1 対象種について

実験にはイシガイ科のイケチョウガイとニセマツカサガイ、シジミ科のマシジミの3種の二枚貝を用いた（図2）。イケチョウガイは、滋賀県真珠養殖漁業協同組合から購入した個体を用い、ニセマツカサガイとマシジミは、諫早湾干拓地周辺の水路で自然繁殖している個体群から採集した個体を用いた。

2.2 摂餌量（濾水速度および除去量）の測定

上述の二枚貝3種を対象として、平成29年8月に調整池の水を用いて摂餌実験を行った。実験に使用した調整

*Feasibility study on Water quality improvement of Isahaya Bay Regulating Reservoir by using a freedding activity of freshwater bivalves

**Riho Kuwaoka, Tomoyuki Kasuya（長崎県環境保健研究センター）Nagasaki prefectural Institute of Environment and Public Health

〔全国環境研会誌〕Vol.43 No.4 (2018)



図2 二枚貝3種の殻長計測部位
(バーで表した部分を殻長として計測した。)

池の水は予め2Lをポリエチレンボトルに採り、COD、クロロフィルa(以降、Chl. a)を測定した。なお、CODは100℃における過マンガン酸カリウムによる酸素消費量(JIS K0102 17)、Chl. aは抽出蛍光法(海洋観測指針)により求めた。調整池の水が入った円形アクリル水槽を5個用意し、コントロールを除く4個に二枚貝を種ごとに入れた(表1)。庫温を28℃に設定し、遮光したインキュベーター(SANYO GROWTH CABINET MLR-350H)内に、すべての水槽を移し、常時エアレーションを行いつつ2時間静置した。

実験終了後、水槽水2Lをポリエチレンボトルに採り、CODおよびChl. aの分析に供した。実験開始前と終了時の各分析項目の濃度差から、後述の式を用いて濾水速度及びCOD除去量を算出した。

採水終了後、二枚貝を取り出し、ノギスを用いて殻長を計測するとともに(図2)、電子はかりを用いて殻付湿重量(WW)を計測した。

2.3 水温に対する濾水速度の応答の測定

水温に対する濾水速度の応答を測定するために、水温10℃、15℃、20℃、25℃、30℃の条件下で摂餌実験を行った。実験に先立ち、水道水10Lを入れた円形アクリル水槽を、庫温を一定に保ったインキュベーター内にエア

表1 摂餌量の測定に用いた種とその概要

対象種	個体数	殻長 (mm)	水槽水量 (L)
イケチョウガイ	大	201	10
	小	124, 129	10
ニセマツカサガイ	10	52 ~ 70	10
マシジミ	93	11 ~ 23	5
コントロール	-	-	10

レーションを行いつつ24時間設置し、水槽水の塩素分を除去した。

二枚貝の餌としては、稚仔魚などの餌として流通している微細藻類である濃縮ナンノクロロプシス(*Nannochloropsis* sp.)を、購入後-20℃で凍結保存したものを解凍して用いた。解凍後、200倍程度に希釈したナンノクロロプシスを、クロロフィル蛍光強度が12となるよう、アクリル水槽表層に垂下したクロロフィル濁度計(JFEアドバンテック社製、INFINITY-CLW)でモニタリングしながら添加した。餌が均一となるように攪拌した後、コントロールを除くすべてのアクリル水槽に、予め実験水温条件下に4時間馴致させた二枚貝を種類ごとに投入し(表2)、エアレーションをしながら遮光したインキュベーター内で3時間摂餌させた。

摂餌実験終了後、水槽内のクロロフィル蛍光強度をクロロフィル濁度計で計測し、実験前後の数値の差から後述の式を用いて濾水速度を求めた。蛍光強度を測定後、二枚貝を取り出し、ノギスを用いて殻長を計測するとともに(図2)、電子はかりを用いて殻付湿重量を計測した。

2.4 濾水速度および除去量の算出

濾水速度(L/h)の算出にあたっては、次式を用いた。

$$\text{濾水速度 (L/h)} = V/t \{ \ln(C_0/C_t) - \ln(C_{c0}/C_{ct}) \}$$

ここで、V:実験に用いた水量(L)、t:実験時間(h)、 C_0, C_t :実験開始前および実験終了時のChl. a濃度($\mu\text{g/L}$)または蛍光強度、 C_{c0}, C_{ct} :コントロールの実験開始前および実験終了時のChl. a濃度($\mu\text{g/L}$)または蛍光強度を表す。

CODの除去量(mg/h)は次式を用いて計算した。

$$\text{COD除去量} = V/t \{ (D_0 - D_t) - (D_{c0} - D_{ct}) \}$$

ここで、V:実験に用いた水量(L)、t:実験時間(h)、 D_0, D_t :実験開始前および実験終了時のCOD値(mg/L)、 D_{c0}, D_{ct} :コントロールの実験開始前および実験終了時のCOD値(mg/L)を表す。

3. 結果と考察

3.1 摂餌量

表2 水温に対する濾水速度の応答の測定に用いた種とその概要

対象種	個体数	殻長 (mm)	水槽水量 (L)
イケチョウガイ	2	123 ~ 31	10
ニセマツカサガイ	4	59 ~ 74	10
マシジミ	29 ~ 35	12 ~ 25	10
コントロール	-	-	10

表 3 二枚貝 3 種の 28℃における単位湿重量当たりの濾水速度 (FR) および COD 除去量

		FR (L/kgWW/h)	COD 除去量 (mg/kgWW/h)
イケチョウガイ	大	2.1	4.2
	小	6.0	7.4
ニセマツカサガイ		19	15
マシジミ		66	28

表 4 各水温条件下における二枚貝 3 種の単位質湿重量当たりの濾水速度 (FR) (括弧内の値は平均値である。)

	FR (L/kgWW/h)				
	10℃	15℃	20℃	25℃	30℃
イケチョウガイ		0.8	1.7	2.9	0.70
		0.18	0.26	0.80	1.8
		(0.53)	(1.2)	(2.3)	(0.60)
ニセマツカサガイ		1.8	6.0	6.9	0.50
	1.3	0.27	1.2	4.6	3.1
		(1.0)	(3.6)	(5.7)	(1.8)
マシジミ		0	12	8.3	1.1
	2.6	0.97	4.3	27	20
		(0.48)	(8.1)	(18)	(11)

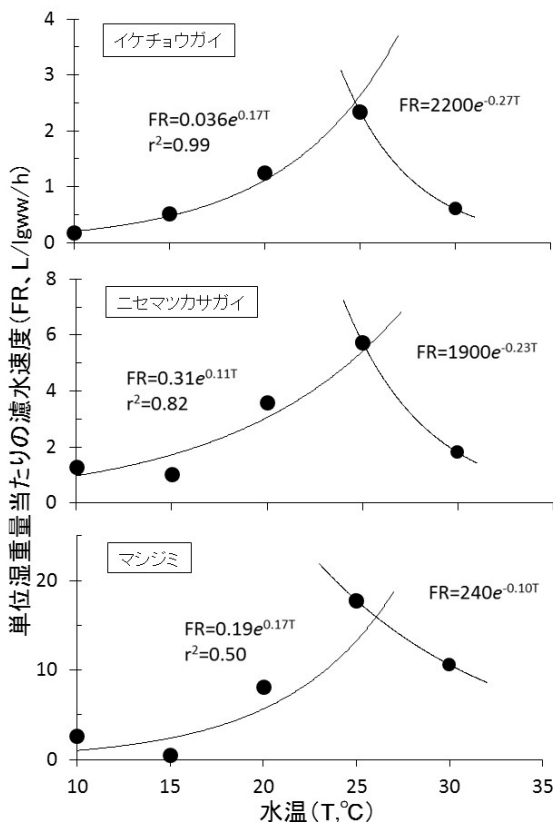


図 3 二枚貝 3 種の単位湿重量当たりの濾水速度 (FR) と水温 (T) との関係 (図中の実線および点線は、近似式 $FR = a \times \exp(bT)$ を表す。近似式は水温 10~25℃ と 25~30℃ の区間それぞれに当てはめた。)

水温 28℃におけるイケチョウガイ、ニセマツカサガイ、マシジミの単位湿重量当たりの濾水速度 (以降、FR) および COD 除去量を表 3 に示す。FR は 2.1~66 L/kgWW/h の範囲で、マシジミが最も高い値を示した。COD 除去量は 4.2~28mg/L の範囲であり、FR と同様にマシジミが最も高い除去量を示した。

同種間で比較すると、イケチョウガイの大型個体と小型個体とでは、FR と COD 除去量は小型個体で高い結果となった。二枚貝は水管から取り込んだ水に含まれる餌粒子を鰓表面で濾しとって摂餌する。理論上、鰓の表面積は殻長の 2 乗に比例するのに対して、湿重量は殻長の 3 乗に比例すると考えられることから、単位湿重量当たりの摂餌量は殻長の小さな個体でより高い値となる。

3.2 水温に対する濾水速度の応答

二枚貝 3 種の各水温条件下における FR を表 4 および図 3 に示す。測定回ごとに差が見られたものの、FR は 3 種ともに水温 25℃において最も高くなる傾向が見られた。従って、25℃から 30℃の間に、水温に対する変曲点があると考えられることから、FR データを水温 10~25℃と 25~30℃の二つのグループに分けて解析を行った。

温度依存性の検証には一般に指数関数 $FR = a \times \exp(bT)$ が用いられる。ここで、a、b は定数、T は水温を表す。そこで、各水温の FR の平均値を用いて、それぞれのグループごとに指数式を当てはめて定数 b 値 (図 3) を求めるとともに、温度係数 Q_{10} を求めた。 Q_{10} は温度が 10℃上昇したときに反応が何倍になるかを指数化したものであり、 $Q_{10} = \exp(10 \times b)$ によって算出できる。水温 10~25℃の間では、 Q_{10} はイケチョウガイおよびマシジミで 5.4、ニセマツカサガイで 3.0 であった。水温 25~30℃の間では、 Q_{10} はイケチョウガイとニセマツカサガイはそれぞれ 0.06 と 0.10 であるのに対して、マシジミは 0.36 であった。

水温 10~25℃の間ではいずれの二枚貝も水温上昇とともに摂餌活性は高くなった。一方、水温 25~30℃の間では、3 種ともに水温上昇とともに摂餌活性は低下し、イケチョウガイとニセマツカサガイでより顕著であった。イケチョウガイとニセマツカサガイはイシガイ科の二枚貝であるのに対して、マシジミはシジミ科の二枚貝である。科の違いが水温に対する摂餌の応答の差に表れているのかもしれない。

調整池におけるイケチョウガイの飼育実験では、水温が 30℃以上となる夏場に死亡数が増加する傾向が見られた⁸⁾。水温上昇に伴う摂餌活性の低下による栄養状態の悪化が死亡数増加の一因となっている可能性がある。マシジミもイケチョウガイと同様に水温 25~30℃の間で摂餌活性は低下するものの、その割合はイケチョウガ

イやニセマツカサガイよりも緩やかであった。調整池周辺ではマシジミは浅い用水路のような夏期に水温が上昇しやすい環境下でも生息が確認できることから、同種の摂餌特性はイケチョウガイなどよりも温度変化の大きな環境下に対応しやすいものと思われる。

3.3 水質浄化能力の試算

水温 28°C における COD 除去量 (COD₂₈, 表 3) と水温に対する FR の応答 (表 4, 図 3) を用いて、二枚貝 3 種の年間の COD 除去量を算出することができる。

ある水温 (T, °C) における COD 除去量 (COD_T, mg/kgWW/h) は $COD_T = COD_{28} \times f(T)$ によって求められる。ここで、 $f(T)$ は水温依存項を表す。イケチョウガイ、ニセマツカサガイ、そしてマシジミの摂餌量は水温 25~30°C の間に変曲点を持つと考えられることから、 $f(T)$ は COD 除去

表 5 二枚貝3種の水温依存項

	水 温	
	≤28°C	28°C <
イケチョウガイ	$f(T) = e^{(0.17 \times (T-28))}$	$f(T) = e^{(-0.27 \times (T-28))}$
ニセマツカサガイ	$f(T) = e^{(0.11 \times (T-28))}$	$f(T) = e^{(-0.23 \times (T-28))}$
マシジミ	$f(T) = e^{(0.17 \times (T-28))}$	$f(T) = e^{(-0.10 \times (T-28))}$

表 6 二枚貝 3 種の月別の COD 除去量 (mg/kgWW)
(水温は諫早湾干拓調整池の観測点 B1 において九州農政局が測定した水温データ (平成 24 年度から 26 年度) を平均したものである⁹⁾。)

水温 (°C)	イケチョウガイ	ニセマツカサガイ	マシジミ
18	980	3,500	3,700
22	2,000	5,600	7,600
25	3,200	7,500	12,000
29	4,200	8,600	19,000
29	4,200	8,600	19,000
26	3,800	8,400	15,000
21	1,700	5,000	6,400
14	500	2,200	1,900
8	130	1,200	700
6	130	960	500
8	170	1,100	640
11	310	1,700	1,200
合計	21,000	54,000	88,000

量データを得た水温 28°C を境界として、水温に対する応答を示す b 値を用いることによって、表 5 のように表すことができる。

調整池において九州農政局が調査している観測点 B1 の水温データを用いて、年間の単位湿重量当たりの COD 除去量を算出した結果、イケチョウガイは 21,000 mg/kgWW、ニセマツカサガイとマシジミはそれぞれ 54,000 および 88,000 mg/kgWW であった (表 6)。

環境研センターでは平成 28 年度から、調整池においてイケチョウガイを 18 個体/m² に相当する密度で飼育している⁸⁾。そこで、面積およそ 320 ha である調整池潜堤内水域 (図 1) で殻長 140 m (170 gWW) のイケチョウガイを 18 個体/m² の密度で飼育した場合、年間の COD 除去量は 210,000 kg、日平均で 580 kg と見積もられた。諫早市にある諫早中央浄化センターの 1 日当たりの COD 除去能力は、約 870 kg であることから (諫早市上下水道局聞き取り)、このイケチョウガイ群による COD 除去能力は下水処理場 0.66 ヶ所分に相当する。同様に、イケチョウガイを 2 個体/m² で飼育した場合の COD 除去量を求めると、年間で 23,000 kg、日平均で 64 kg であり、これは下水処理場 0.07 ヶ所分に相当する。ほぼ同規模の大村湾南部浄化センターの建設費はおよそ約 540 億円、維持管理費は年間で約 3 億円であることから¹⁰⁾、イケチョウガイの COD 除去量は、貨幣価値に換算すると、飼育密度が 18 個体/m² では 360 億円、2 個体/m² では 40 億円に相当すると考えられる。

環境研センターではイケチョウガイを滋賀県真珠養殖漁業協同組合から 1 個体 600 円で購入している。従って、イケチョウガイ購入にかかる費用は、18 個体/m² の飼育密度では約 340 億円、2 個体/m² の飼育密度では 37 億円であり、貝類が 1 年も生存すれば浄化の貨幣価値を下回ると試算された。

一般にイケチョウガイの寿命は 38 年以上と推定されている¹¹⁾。仮に、イケチョウガイを 10 年間飼育すると仮定すると、同種による COD 除去量および購入にかかる費用は表 7 のようになり、18 個体/m² と 2 個体/m² の両方

表 7 イケチョウガイを 10 年間飼育した場合の、COD 除去量と 1 年当たりの費用および浄化の貨幣価値 (大村湾南部浄化センター建設費約 540 億、維持管理費年間約 3 億円からの試算である。)

	COD 除去量	費用	浄化の貨幣価値
	(kg)	(百万円/年)	(百万円)
18個体/m ²	2,100,000	3,400	38,000
2個体/m ²	230,000	370	4,200

の場合において、イケチョウガイの購入にかかる費用は浄化の貨幣価値を大幅に下回る。したがって、イケチョウガイによる水質浄化を行う際は、長期に渡って飼育することが重要であり、生残率を高める飼育手法を確立することが重要と考えられる。

マシジミやニセマツカサガイのような小さな二枚貝は、波浪による埋没などによって生残が困難であると考えられる（粕谷未発表）。一方で調整池周辺には水田に水を供給するための用水路が縦横に存在する。そこで、一例として調整池周辺の水路（長さ 450 m, 幅 2 m）にニセマツカサガイとマシジミが生息した場合の COD 除去量を見積もった。

ニセマツカサガイおよびマシジミの調整池周辺における生息密度はおおよそ 11 個体/ m² および 350 個体/ m² であった。そこで、それらの密度で用水路に生息した場合の年間の COD 除去量は、ニセマツカサガイで 7.5 kg, マシジミでは 66 kg となり、日平均すると 0.02 kg, 0.18 kg となった。これらはそれぞれ下水処理場 0.00002 個分 および 0.00021 個分に相当することから、130 万円および 1,100 万円の貨幣価値に相当する。

ニセマツカサガイとマシジミは周辺水路に自然繁殖しているため、個体を確保するためのコストがかからないことから、イケチョウガイより水質浄化の貨幣価値が小さくとも、費用対効果は大きいと考えられる。ニセマツカサガイやマシジミを用いた水質浄化では、それらが用水路で生息・繁殖し、定着するような、生息場の造成手法を確立することが重要と考えられる。

5. 引用文献

- 1) 九州農政局: 諫早湾干拓調整池水質検討委員会 資料, 1, 48-51, 2018

- 2) 石崎修造, 他: イケチョウガイによる諫早湾干拓調整池の水質浄化に関する研究. 長崎県環境保健研究センター所報, **53**, 47-52, 2007
- 3) 荒木孝保, 他: 諫早湾干拓調整池及び中央遊水池における二枚貝（ヤマトシジミおよびイケチョウガイ）の生息適応性に関する研究. 長崎県環境保健研究センター所報, **57**, 54-64, 2011
- 4) 粕谷智之, 他: 諫早湾干拓調整池及び中央遊水池における二枚貝（ヤマトシジミおよびイケチョウガイ）の生残, 成長及び再生産に関する研究. 長崎県環境保健研究センター所報, **58**, 45-51, 2012
- 5) 粕谷智之, 他: 水田水路におけるマシジミ増殖の可能性について. 長崎県環境保健研究センター所報, **60**, 50-60, 2014
- 6) 陣野宏宙, 他: 諫早湾干拓調整池におけるイケチョウガイの地蒔き飼育の可能性に関する研究. 長崎県環境保健研究センター所報, **61**, 72-78, 2015
- 7) 粕谷智之, 他: 水田水路におけるマシジミ増殖の可能性について (その2). 長崎県環境保健研究センター所報, **61**, 29-37, 2015
- 8) 粕谷智之, 他: 諫早湾干拓調整池におけるイケチョウガイの飼育. 長崎県環境保健研究センター所報, **62**, 32-39, 2016
- 9) 九州農政局: 諫早湾干拓事業環境モニタリングデータ等の公表について, <http://www.maff.go.jp/kyusyu/seibibu/info/20060823.htht> (2018.11.1アクセス)
- 10) 長崎県: 長崎県汚水処理構想—最も効率的な汚水処理の在り方—, p. 277, 2017
- 11) 近藤高貴: 日本の希少な野生生物に関する基礎資料 (I), pp. 25-32, 日本水産資源保護協会, 東京, 1995