洞海湾における水質改善前後でのコウロエン カワヒバリガイ *Xenostrobus securis* の動態

梶原葉子*

北九州市保健環境研究所, 〒804-0082 福岡県北九州市戸畑区新池1丁目2-1

Water quality improvement effect on the population dynamics of an alien mussel, *Xenostrobus securis* in Dokai Bay, Japan

Yoko Kajiwara*

Kitakyushu City Institute of Health and Environmental Sciences, 1-2-1 Shin-ike, Tobata-ku, Kitakyushu 804-0082, Japan

* Corresponding author: Yoko Kajiwara E-mail: youko_kajiwara01@city.kitakyushu.lg.jp

(Received March 6, 2020; Accepted March 22, 2021; Published Online June 30, 2021)

Abstract

I studied an alien bivalve's (*Xenostrobus securis*) distribution to understand its occurrence range better. I compared the bivalve's horizontal seasonal change, vertical distribution, and population dynamics between periods of heavy eutrophication (1991–1992) vs. periods when water conditions were improved (2010–2011) in Dokai Bay, northern Kyushu, Japan.

Xenostrobus securis was the dominant species in both periods. The total number of sessile animal species increased in the latter period, although this mussel's biomass in the latter period decreased to about 29% of the former period. I observed *X. securis*' wide distribution all year round, and the small mussels' recruitment occurred in the bay's inner and central areas in the former period. Meanwhile, in the latter period, small mussels were similarly recruited to a wide area in summer, but the population declined significantly after summer, except in the bay's inner part. As a result, this mussel's distribution became uneven in most inner and intertidal zones, where the environmental conditions were harsh. I found a negative correlation between *X. securis*' biomass and the sessile animal species richness. This result suggests that improved water environment bears richer biodiversity and is not suitable for *X. securis*.

Keywords: *Xenostrobus securis*, Dokai Bay, eutrophication, introduced bivalve, biodiversity

緒言

北九州市の洞海湾は全長約13 kmの細長い小さな内湾で、かつて産業排水による深刻な水質汚濁により、湾の一部には無生物地帯が生じ、1960年代には「死の海」とまで称された。その後、水質浄化対策が実施されるにいたる水質は急速に改善され、1980年代には生物の復帰が確認された。付着動物は1991年から1992年の調査で生息が確認されたが(梶原・山田, 1997)、当時は赤潮や貧酸素水塊が発生するなど依然として富栄養化が著しい状態であった。しかし、1997年に洞海湾水域が「全窒素・全リン(りん)に係る水質環境基準」について水域類型が第IV類型に指定され(環境庁, 1997)、流入負荷削減の努力がなされた結果、全窒素(TN)、全リン(TP)の濃度は低下し、2001年には環境基準が達成された(北九州市環境局, 2003)。

このような「全窒素・全リンに係る環境基準」達成前後の1991–1992年と2010–2011年に付着動物調査が行われた(以下、それぞれを前期調査、後期調査と呼称する)。その結果、達成後にはTNやTPが著しく減少し、

富栄養化が改善され、溶存酸素が湾奥まで行きわたるようになったことが確認された。一方、湾奥まで多くの付着動物が出現し、出現種類数も増加して、生物相が大きく変化した。湾内に出現した付着動物の総種類数は74種から118種へと1.6倍に増加したが、付着動物総湿重量は5分の1に減少した。このような付着動物総湿重量の大幅な減少は、前期調査に総湿重量の85%を占めていたムラサキイガイ *Mytilus galloprovincialis*、マガキ *Crassostrea gigas* およびコウロエンカワヒバリガイ *Xenostrobus securis* の3種の二枚貝が、後期調査ではそれぞれの湿重量が前期調査の場合の約2%、1%および29%へと、著しく減少したことによる。ムラサキイガイとマガキについては湾全域で激減しており、洞海湾において1980年以降、水温の上昇傾向が認められ、前期調査と後期調査においてもその傾向が確認されたが、この2種の減少に水温上昇が影響していることが推定された。これに対して、コウロエンカワヒバリガイは湾全体では減少したものの、湾奥では増加しており、変化の状況は地点によって異なり、水温上昇とは関連が認

められず、富栄養化に関連した項目である溶存酸素量 (DO) と負の相関、TP と正の相関関係が見られた (以上、梶原・山田, 2019)。

コウロエンカワヒバリガイはムラサキイガイと並び侵略的外来種として日本の中部以南各地の都市の内湾で優占している種であり (岩崎, 2013)、多くの外来種の分布拡大が危惧されている中で、洞海湾水域では富栄養化の改善に伴い、他の付着生物とは異なる分布挙動を示すことが明らかになった。そこで、このようなコウロエンカワヒバリガイの変化の詳細を水深別の分布状況の変化、岸壁での被度の季節変化、個体群動態について調査してこの減少の原因を検討し、本種の水質に対する特性を明らかにすることを本研究の目的とした。

材料と方法

出現した付着動物の採集調査時期は梶原・山田 (2019) と同じく、前期調査は1991年10月16日、1992年5月11日、8月24日、および12月15日に行い、後期

調査を2010年8月4日、10月19日、12月10日、および2011年5月18、19日に実施した。後期調査は、前期調査とほぼ同じ5地点 (Stn 1~5) で調査を行い (Fig. 1)、試料の採集層は各調査地点の潮位表基準面を潮位0とし、潮位+20~+50 cmの潮間帯を上層、潮位-50~-80 cmの潮下帯を中層、海底から120~150 cmを下層の計3層を前期と同様に設定した。

また、岸壁に生息しているコウロエンカワヒバリガイと付着動物の季節的な消長を調べるために2014年2月から2015年7月にわたり、Stn 2近傍の人工岸壁にStn A、Stn 4近傍の干潟上のブロック塊壁面にStn Bと2箇所の地点を選定し、目視観察による調査を行った。調査では大潮干潮時に潮間帯 (潮位+50~+80 cm) において付着動物を観察し、出現種とその被度を測定した。この観察では被度の測定に、古瀬・風呂田 (1985) と同様の方法により、30 cm×30 cmの枠に格子状に糸を張った100の交点を持つ方形網を用いた。100の交点に対してコウロエンカワヒバリガイが交点に出現した数を計数し、3回の計数結果の平均を被度 (%) とした。

付着動物の採集と同時に水質の測定を行ったが、測定項目、測定方法並びに付着動物の採集、処理、同定および計測方法は、梶原・山田 (1997) に準じた。また、小濱ら (2001) が前期調査で実施した方法と同様に、後期調査のコウロエンカワヒバリガイの殻長をノギスで測定し、調査地点毎に上・中および下層の3層を合計してコホート (年級群) 解析を行った。

結果

1. 出現状況

コウロエンカワヒバリガイの後期調査における地点および層別の出現状況をFig. 2の右側に示した。なお、比較のためにすでに報告されている前期調査結果 (梶原・山田, 1997) を左側に示した。

コウロエンカワヒバリガイは後期調査では夏季においては湾奥部から湾中央部に分布したが、その他の季節では湾奥部Stn 1、Stn 2の上層に生物量が多く、湾中央部Stn 3、Stn 4では少なくなっていた。最も湿重量が多かったの

Fig. 1. Study area in Dokai Bay.

●: sampling station; △: observation station.

Date			Stn				
			1	2	3	4	5
1992 Aug.	U				★		
	M						0
	L						
1991 Oct.	U			★	★		
	M			★			0
	L						
1992 Dec.	U	★					0
	M						0
	L						
1992 May	U		★				
	M		★				0
	L						0

Date			Stn				
			1	2	3	4	5
2010 Aug.	U	★					0
	M						0
	L		0				0
2010 Oct.	U				0		0
	M		0			0	0
	L			0	0	0	0
2010 Dec.	U	★			0		0
	M		0			0	0
	L		0	0	0	0	0
2011 May	U	★					0
	M		0				0
	L		0		0		0

Fig. 2. Distribution of *Xenostrobus securis* expressed as the biomass (wet weight, g/m²) at each station.

Data of the former period was cited from Kajiwara & Yamada (1997). U, Upper part; M, Middle part; L, Lower part. 0, 0; , <1; , 1-10; , 10-100; , 100-1000; , 1000-3000; , >3000

Fig. 3. Seasonal size changes in *Xenostrobus securis*' distribution.

は5月のStn 1の上層で6,800 g/m²、個体数が最大だったのは8月のStn 1の上層で100,000 個体/m²であった。また、湾口部のStn 5は全く採集されなかった。以上のようにコウロエンカワヒバリガイは後期調査においては分布の中心はStn 1であり、湾内の出現頻度も31回で、下層に限っては6回と少なかった。

2. 個体群動態

後期調査時の各調査地点におけるコウロエンカワヒバリガイの殻長組成の変化をFig. 3に示す。新規加入群はStn 1~4において8月に認められた。湾最奥部のStn 1では時間の経過とともにモード値が増大し、本種の成長とともに個体群の維持が確認された。一方、湾中央のStn 3、Stn 4では10月以降ほとんど本種が認められず、個体群は消滅した。本種の出現は8月では、Stn 1~4の広範囲であり、その他の季節ではStn 1、Stn 2に偏在し、Stn 3、Stn 4では非常に少なかった。

3. 被度の季節変化

湾奥Stn Aと湾中央Stn Bにおける本種の被度の季節変化をFig. 4に示す。Stn Aでは季節を通じて本種の被度が、8月から10月において20%を下回ったものの、その他の月では20~34%の値を維持した。一方、Stn Bでは9月と10月に被度が約30%でピークを示す変化を見せたが、その他の季節では減少し、2014年7月、2015年の5月と7月の被度は0であった。このようにStn Bでは春季5月から夏季7月にはほとんど個体が観察されず、1年を通じて安定した個体群は確認されなかった。

また、コウロエンカワヒバリガイ以外の付着動物としては、Stn Aでは季節を通じてフジツボ類（タテジマフジツボ *Amphibalanus amphitrite* とアメリカフジツボ *Amphibalanus eburneus*）とマガキのみ季節を通して出現

Fig. 4. *Xenostrobus securis*' monthly percent coverage (30×30 cm²) change at the intertidal zone (50–80 cm above the standard sea level) at Stn A and Stn B, in Dokai Bay, Japan.

した。一方、Stn Bではマガキとコウロエンカワヒバリガイおよび管棲多毛類が優占したが、マガキ、管棲多毛類、ヒザラガイ類、腹足類およびフジツボ類（アメリカフジツボとタテジマフジツボ）は四季にわたり出現し、春季にはマガキ以外のカキ類、冬季には海藻も見られた。

考察

コウロエンカワヒバリガイの分布は前期調査・後期調査ともに湾口部には少なく、湾奥から湾中央であった (Fig. 2)。しかし、その分布の様相は前期調査と後期調査で大きく異なっていた。前期調査には湿重量1,000 g/m²以上の濃密な現存量が認められた地点がStn 2およびStn 3で、特にStn 2では上層、中層だけでなく海底付近の水深7mの下層においても5月の現存量が多かった。一方、分布域においてはStn 2、Stn 3を中心に湾奥と湾中央の地点で高い現存量で出現し、5地点の全てで出現した。これに対し、後期調査では湾口部Stn 5では全く出現せず、Stn 1の上層以外での現存量が激減し、4回の調査の全地点総湿重量も前期調査の29%となり大きく減少した。

コウロエンカワヒバリガイの年間平均湿重量と水質環境要因との関係については既に報告された研究(梶原・山田, 2019)によると、過去20年間で変化の傾向が見られ、本種湿重量との間に有意な相関($p < 0.05$)が認められたのは、各地点のDO最低値($r = -0.77$)とTP($r = 0.67$)であった。これら2項目は富栄養化や水質汚濁と関連の深い項目である。

TPの地点毎の年平均値は前期調査においてはStn 1~Stn 4において0.07~0.18 mg/Lであったが、後期調査ではStn 1のみが、0.09 mg/Lで(梶原・山田, 2019 図2参照)、前期調査の最低値を上回った。このように後期調査時には湾全体の富栄養化のレベルが下がり、後期調査の湾奥Stn 1のみが前期調査のStn 2およびStn 3に近い富栄養度の高いレベルであった。本種の合計湿重量は、Stn 1でのみ、前期調査の値の1.5倍に増加したが、Stn 2およびStn 3では前期調査の各値の、それぞれ6.9%、0.6%に減少した。洞海湾においては窒素・リン総量規制により、栄養塩・懸濁態有機物質の負荷量が減少し、水中のプランクトン由来と推定された懸濁粒子、特に粒子状リンが減少したことが報告されている(Yamada, 2015; 柳・山田, 2014)。湾内の懸濁物の減少はろ過食であるコウロエンカワヒバリガイの生息に影響を与えた可能性がある。

また、前期と後期の調査結果について本種の5地点の地点毎の3層、4回の調査の平均湿重量(延べ10データ)と4回の調査で出現した地点毎の付着動物総種類数(延べ10データ)との相関係数を算出したところ、有意な($p < 0.05$)負の相関関係($r = -0.71$)が認められた。また、前期調査の場合には、本種について、地点毎の年間平均湿重量と付着動物総種類数との間に有意でないものの負の相関があったことが報告されている(小濱ら, 2001)。洞海湾における付着動物の出現種種類数は、先に報告されているように(梶原・山田, 2019)、前期調査で74種、後期調査で118種となり、1.6倍に増大した。特に後期調査では腹足類の種類の増加が顕著であった。各地点の付着動物の種類数は両期とも湾口ほど多かったが、前期調査ではStn 4で25種であり、後期調査では最も少なかったStn 1の27種がそれを上回っていた。多くの種の付着動物の出現に最も大きな影響があった環境要因は貧酸素(DO最低値)であり、後期調査のDO最低値は湾内で最も低かったStn 1でも前期調査のStn 1~Stn 4の地点のDOの最低値より高かった。このことから明らかに、貧酸素の改善が付着動物の種多様度の増加に貢献したと考えられる(梶原・山田, 2019)。これとは対照的にコウロエンカワヒバリガイの湿重量とDO最低値には強い負の相関があったが(梶原・山田, 2019)、本種の減少は水質環境の改善に伴い貧酸素が解消され、出現する付着動物の種類が増加し、多くの生物が生息するようになったことが影響していると考えられる。

コウロエンカワヒバリガイの個体群動態については小濱ら(2001)による前期調査では湾奥部を中心にStn 1~

4の広範囲に四季を通じて出現し、新規加入と成長が見られた。一方、後期調査において夏季に新規加入がStn 1~4で認められたが、秋季以降、湾奥以外では大きく減少し、生残、成長した個体群が見られなかった。本種の個体群動態についての前期調査と後期調査の違いは、前期調査時には湾内の広範囲で本種が定着、成長したが、後期調査では湾奥でしか定着、成長できなかったことである。水質改善の過程で湾奥以外の地点は付着した個体の生息に適さない環境に変化したと考えられる。

後期調査の被度の季節変化でみられた湾奥部と湾奥部での夏季加入群に消長にみられた大きな違いは、付着した個体群が成長していく際に生息環境が地点により異なり、湾口に近づくほど付着しても生息には適していない環境であったためと考えられる。

コウロエンカワヒバリガイの付着・生残・成長に影響する条件としては、付着基盤上での競争や他の生物による捕食が考えられる。水質改善後はホヤ類、海綿類、苔虫類および他の多くの貝類などが湾全体に分布範囲を拡大させたことにより、場を巡る競争が激しくなったと考えられる。本種の生残に影響を与えた捕食者としては腹足類の存在が挙げられる。前期調査では湾口部Stn 5のみでしかほとんど出現しなかった肉食性の腹足類が後期調査では湾奥まで出現しており、捕食圧の増大が推測される。また、後期調査の前、2002年から2004年に湾内のStn 4の対岸に設置されたイガイ類をロープに自然に付着させる筏型の実験養殖施設でウミタナゴ、メバルなどが付着生物を摂食する様子が確認されたが、ナルトビエイがイガイ類を捕食する様子も実際に観察されている(田中ら, 2005)。水質改善の前後の1989~1990年と2005~2006年には、湾内で魚類、エビ・カニ類の調査が行われ、湾口では優占種が甲殻類からウミタナゴ、マダイ、コモンフグなどの魚類に変化したことが報告された(上田, 2008)。このような魚類などによる捕食の影響も大きくなった可能性がある。

コウロエンカワヒバリガイが後期調査ではStn 1においてのみ現存量の減少が見られず、特にStn 1の上層に局在するようになったが、湾奥の上層では干出、低塩分、富栄養化などの過酷な環境のため多くの生物は生息が困難なため競争が少なく、捕食する動物も少ないために付着した個体が生残・成長したと考えられる。

海域での外来種についての研究において、外来種数は低塩分の海域ほど多く、競争者や捕食者となる在来種数が少ないほど多いと報告され(Ruiz et al., 2000, 2013; Paavola et al., 2005; Otani & Willan, 2017)、岩崎(2017)も京都府の固着動物の調査において外来種数と在来腹足類種類数の間に負の相関があったと報告しており、腹足類の多い生物多様性の高い環境は多くの外来種にとって生育に適してはいないことが考えられる。洞海湾の外来種でろ過食性の腹足類シマメノウフネガイ *Crepidula onyx* も前期調査には全地点に出現していたのに対し、後期調査では湾奥Stn 1、Stn 2に出現し、コウロエンカワヒバ

リガイの分布と類似する変化の傾向が見られた。

1990年代から20年が経過し、洞海湾の貧酸素状態が改善され、多くの生物にとって良好な環境になったため、コウロエンカワヒバリガイは稚貝が加入できても、生残・成長できずに減少した可能性がある。コウロエンカワヒバリガイの生存戦略は、他の生物にとって過酷な状況で生息する能力を持つ（日和見種）ことであり（小濱ら，2001、青木ら，2011）、環境条件の悪い過酷な環境で個体群を維持できるが、生息域が他の競争生物にとって良好な水質環境へ変化していくと分布は縮小すると推測される。

このように洞海湾では水質環境が改善され、生物の種多様性が増大し、それにもなって外来種であるコウロエンカワヒバリガイの生息域が縮小したことが確認された。本種は日本の多くの内湾で優占しており、過栄養域を指標する種として報告されているが（風呂田，1989）、その分布は種多様性の増大などの生物学的な環境による影響も大きく受けていると考えられる。

要約

コウロエンカワヒバリガイの出現特性を明らかにするために、洞海湾において富栄養化の著しかった1991–1992年（前期調査）と水質が改善された2010–2011年（後期調査）において分布調査を実施し、時空間的变化と個体群動態を明らかにした。

両期間で優占種であった本種は、後期調査では付着動物の種類数は増大したが、本種の生物量は前期調査の29%程度に減少した。前期調査では、本種は稚貝が湾奥から湾央まで新規加入し、四季を通じて湾奥から湾央の潮間帯から潮下帯までの広い範囲で出現した。それに対して後期調査では夏季に湾奥から湾央まで広く稚貝が新規加入してもその後は湾奥以外では現存量が大きく減少し、環境条件の悪い湾奥の潮間帯に偏在するようになった。また、コウロエンカワヒバリガイの生物量は付着動物種類数と負の相関関係が見られ、水質改善後の生物多様性の高い環境は本種の生息には適さなくなったと考えられた。

謝辞

本研究に行うにあたりご指導を賜った福岡県立大学名誉教授山田真知子博士、ならびに有用なご助言を賜った奈良大学教授岩崎敬二博士に心よりお礼を申し上げます。本研究に多大なご支援をいただいた北九州市環境科学研究所の寺師朗子氏（2010年当時）ならびに研究所職員の方々に、深謝いたします。また、編集委員や査読者の皆様には有益なご指摘を賜り、衷心より感謝いたします。2014年から2015年の調査については国立環境研究所II型共同研究「干潟・浅場や藻場が里海里湖流域圏

において担う生体機能と注目生物種との関係（II型研究）に参加して実施しました。また、本研究の後期調査は、三井物産環境基金の研究助成を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 青木 茂・柳内 健・水野佑亮・岡本 研・日野明徳（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，77，606–615．
- 古瀬浩史・風呂田利夫（1985）．東京湾奥部における潮間帯付着動物の分布生態．付着生物研究，5，1–6．
- 風呂田利夫（1989）．水生生物指標に関する研究報告．横浜市公害研究所，神奈川，pp.191–196．
- 岩崎敬二（2013）．外来二枚貝コウロエンカワヒバリガイの日本海沿岸での分布．日本ベントス学会誌，67，73–81．
- 岩崎敬二（2017）．京都府海岸の外来固着動物：2006年と2016年の比較．地域自然史と保全，39，83–98．
- 梶原葉子・山田真知子（1997）．洞海湾における付着動物の出現特性と富栄養度の判定．水環境学会誌，20，185–192．
- 梶原葉子・山田真知子（2019）．沿岸海域における付着動物の環境指標としての検討．水環境学会誌，42，53–65．
- 環境庁（1997）．水質汚濁に係る環境基準について（昭和四十六年環境庁告示第五十九号）別表の水域の欄に掲げる公共用水域が該当する水域類型．平成9年環境庁告示第19号．
- 北九州市環境局（2005）．平成15年版北九州市の環境．北九州市環境局．
- 小濱 剛・門谷 茂・梶原葉子・山田真知子（2001）．ムラサキイガイおよびコウロエンカワヒバリガイの個体群動態と過栄養海域における環境との関係．日本水産学会誌，67，664–671．
- Otani, M. and R. C., Willan (2017). Osaka Bay in Japan as a model for investigating the factors controlling temporal and spatial persistence among introduced marine and brackish species in a heavily industrialized harbor. *Sessile Organisms*, 34, 28–37.
- Paavola, M., S. Olenin and E. Leppäkoski (2005). Are invasive species most successful in habitats of low native species richness across European brackish water seas? *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 64, 738–750.
- Ruiz, G. M., P. W. Fofonoff, J. T. Carlton, M. J. Wonham and A. H. Hines (2000). Invasion of coastal marine communities in North America: apparent patterns, processes, and biases. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 31, 481–531.
- Ruiz, G. M., P. W. Fofonoff, G. Ashton, M. S. Minton and A. W. Miller (2013). Geographic variation in marine invasions among large estuaries: effects of ships and time. *Ecol. Appl.*, 23, 311–320.
- 田中和彦・吉川ひろみ・佐藤尚之・東田倫子・山田真知子・北山英希・河村親和・初山正和・木村尚志・門谷 茂・柳哲雄・松井誠一（2005）．港湾環境における生態学的環境修復技術について．第12回アクア研究センター研究発表会要旨集，北九州市，pp.35–39．
- 上田直子（2008）．洞海湾再生の取り組み．水環境学会誌，31（5），242–243．
- Yamada, M. (2015). Disappearance of Hypoxia in Dokai Bay. In: *Eutrophication and oligotrophication in Japanese estuaries*, eds. Yanagi, T., Springer, NY, USA, pp. 69–97.
- 柳 哲雄・山田真知子（2014）．貧酸素消失過程．洞海湾の更なる水質改善を目指して．洞海湾環境修復検討会，北九州市．112pp．