

## アサリ湧く豊かな伊勢湾・三河湾に

蒲原 聡

(2023年1月31日受付, 2023年2月2日受理)

## Towards the rich Ise and Mikawa Bay where clams spring up

KAMOHARA Satoru\*

## はじめに

生態系により成り立っている海域全体を1つの生物とみなし、海の元気を診断する手法として考え出されたのが「海の健康診断」である。<sup>1)</sup>「多様で豊富な生物が生息することにより、栄養がたく滑らかに循環する海」が「健康な海」であるとの考えに基づいている。これまでは、生物が減少する原因が富栄養化に起因する貧酸素水塊の発生にあるとして、陸域から流入する栄養を減らして水をきれいにすることに主眼をおいてきた。しかし、この「海の健康診断」では、健康な海を取り戻すためには、栄養を制限する対策だけではなく、海の営みを総合的な視野でとらえたバランスの良い対策が必要とした。

<sup>1)</sup> その対策として、干潟の保全と再生、浚渫窪地の埋め戻しが実施された。県内で発生するアサリ稚貝の漁場への移植が軌道に乗ったこともあり、<sup>2)</sup> 1995年から2003年にかけて減少していたアサリの漁獲量は、全国の漁獲量が減少しているにもかかわらず2008年にかけて回復した(図1)。干潟上では、アサリを始めとする二枚貝類主体の生態系が形成された。ところが、その後アサリ漁獲量は徐々に低下し、2014年以降は急減して2017年には2013年の1/10の1,600tとなり、採貝漁業の経営に大きな打撃を与えた。干潟上では、アサリにとって生息環境を脅かす厄介ものとされていたアオサやホトトギスガイでさえも見られなくなった。二枚貝類を始めとする生物の生息を維持することが困難になっていないのが危惧された。そこで、「健康な海」の考えに立ち返り、たく滑らかな栄養の循環、いわゆる「豊かな海」にとって必要なこととは何かを問うことにした。

## 1 環境基準と水質調査

水質環境基準は、人の健康の保護(健康項目)と生活環境の保全(生活環境項目)の視点から設定されている。

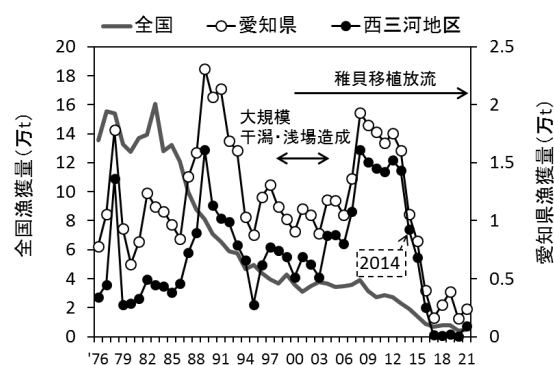


図1 全国、愛知県及び西三河地区のアサリ漁獲量の推移

<sup>3)</sup> 生活環境項目の基準値は、人の生活に密接に関係のある財産(漁業の振興、工業用水の確保、親水環境の確保)ならびに人の生活に密接に関係のある動植物及びその生息環境の保全の視点に基づき、公共用水域の利水目的ごとに定められている。<sup>3)</sup> 水質汚濁を防止するため、生活環境項目のうち、化学的酸素要求量(COD)の環境基準が1970年から1971年度に閣議決定及び告示され、愛知県では1971年度から公共用水域の水質測定が毎月実施された。<sup>4)</sup> 水質総量規制制度の導入により、海域へのCODの排出抑制が推進されたものの、流入する窒素およびリンに起因する植物プランクトンの増殖、いわゆる内部生産により、CODの改善は顕著に認められなかった。そこで、窒素およびリンについて水質環境基準を定めて流入削減を行う必要性が指摘され、海域における全窒素(TN)及び全リン(TP)に係る水質環境基準が、伊勢湾水域は環境庁から三河湾水域は愛知県から1995年度に告示され、1996年度から現測点において公共用水域の水質測定が毎月実施された。<sup>5)</sup> これらの基準達成のために陸域における水質総量規制が1980年度以降、5年ごとに目標を定めて実施されてきた。<sup>6)</sup> CODは当初から、全窒素及び全リンは2000年度から対象となっている。

\* 愛知県水産試験場(Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

## 2 水質の変化

### (1) 水質の長期変動

年間4回実施される伊勢湾広域総合水質調査結果<sup>7)</sup>から、伊勢湾・三河湾の図2の測点におけるTN、TP、溶存態無機窒素(DIN)、リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)、クロロフィル*a*(Chl-*a*)、フェオフィチン(Phaeo)の濃度の1979年から2020年の経年変化を図3に示した。水質の各項目は、減少傾向を示した。TNの減少率は、伊勢湾が39%、三河湾が23%であった。DINの減少率は、伊勢湾が64%、三河湾が50%と著しく、TNに占めるDINの割合は



図2 経年変化に用いた広域総合水質調査測点

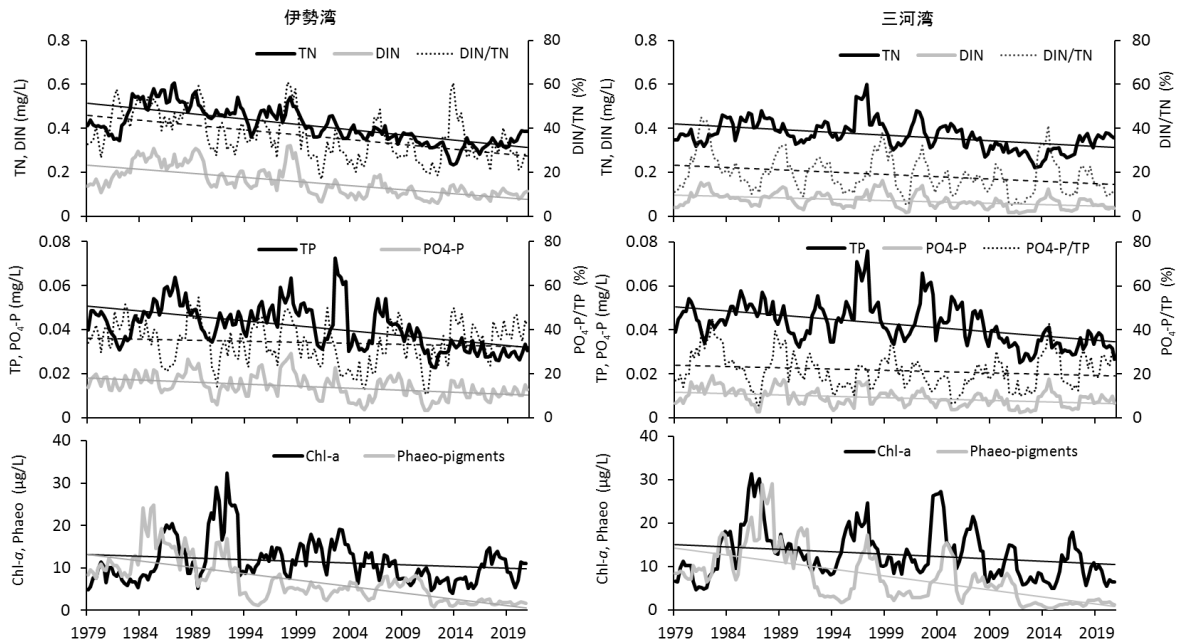


図3 各態窒素・リン及び植物プランクトン色素量(クロロフィル*a*及びフェオ色素)の経年変化

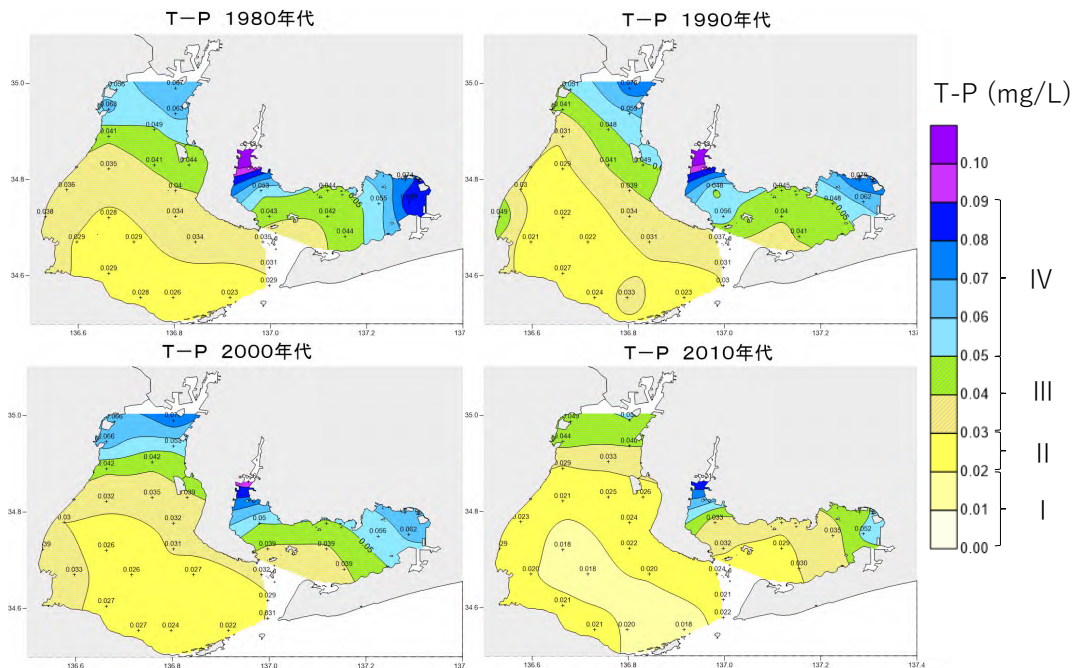


図4 年代別のTP濃度の水平分布

(DIN/TN)は、伊勢湾で46%から28%に、三河湾で23%から15%に低下した。TPの減少率は、伊勢湾が33%、三河湾が31%であった。PO<sub>4</sub>-Pの減少率は、伊勢湾が46%、三河湾が53%と著しく、TPに占めるPO<sub>4</sub>-Pの割合(PO<sub>4</sub>-P/TP)は、伊勢湾で36%から32%に、三河湾で24%から19%に低下した。Chl-*a*の減少率は、伊勢湾が25%、三河湾が29%であった。Chl-*a*が摂餌等によって変化するPhaeoの減少率は、伊勢湾が95%、三河湾が89%と大きな値になった。

TP濃度の年代別の水平分布を図4に示した。<sup>8)</sup>年代を経るごとに、高濃度の範囲が伊勢湾、知多湾及び渥美湾の奥部に収束している。TN及びChl-*a*も同様の傾向にある。<sup>8)</sup>

(2) 陸からの負荷量

1979年から2019年までに伊勢湾・三河湾における窒素及びリンの発生負荷量<sup>9)</sup>は、それぞれ41%及び66%減少している(図5)。

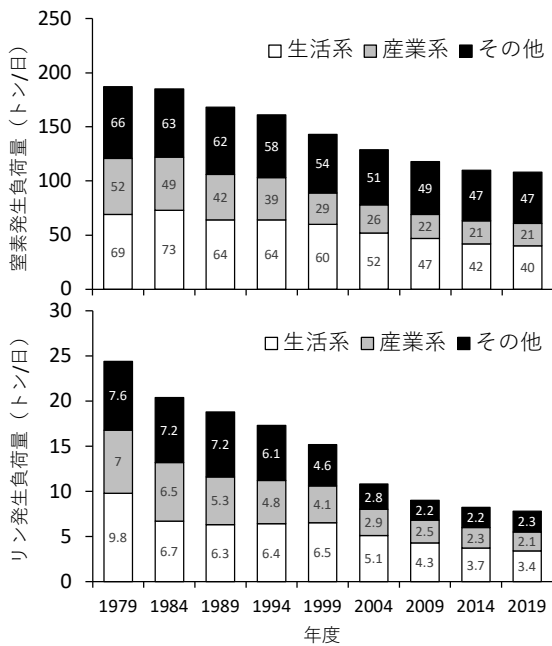


図5 伊勢湾・三河湾における発生負荷量の推移

表1 全窒素及び全リンの環境基準と水産用水基準 (µg/L)

環境基準	II 類型	III 類型	IV 類型
全窒素	X ≤ 300	X ≤ 600	X ≤ 1,000
全リン	X ≤ 30	X ≤ 50	X ≤ 90
水産用水基準	1種	2種	3種
全窒素	X ≤ 300	300 < X ≤ 600	600 < X ≤ 1,000
全リン	X ≤ 30	30 < X ≤ 50	50 < X ≤ 90

(3) 環境基準と水産用水基準の関係及びTN、TPの変化  
 海域のTN及びTPの環境基準の類型指定<sup>10)</sup>を図6に示した。環境基準は、自然環境保全、水浴、水産、工業用水、及び環境保全の利水目的の適正水質を基に作成された。<sup>3)</sup>表1に環境基準と水産用水基準を示した。環境基準のII、III及びIV類型の分類は、水産用水基準の1種、2種及び3種に相当する。2018年には、水産用水基準に水産生物に必要な濃度としての考え方が取り入れられ、2種と3種に下限値が設けられた。<sup>11)</sup>伊勢湾と三河湾の

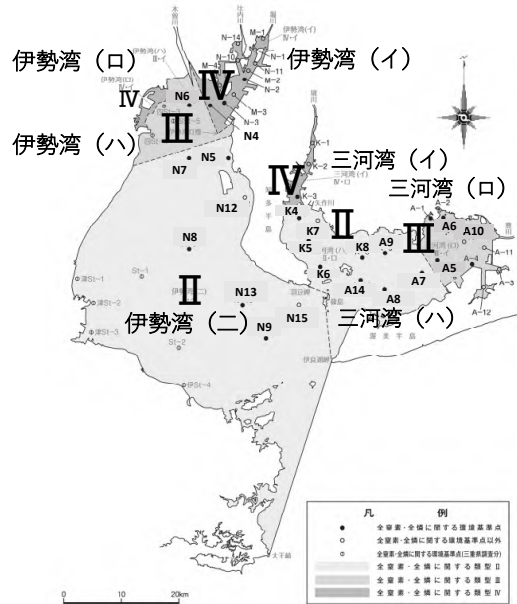


図6 伊勢湾・三河湾におけるTN及びTPの類型指定 (2019年度公共用水域及び地下水の水質調査結果)

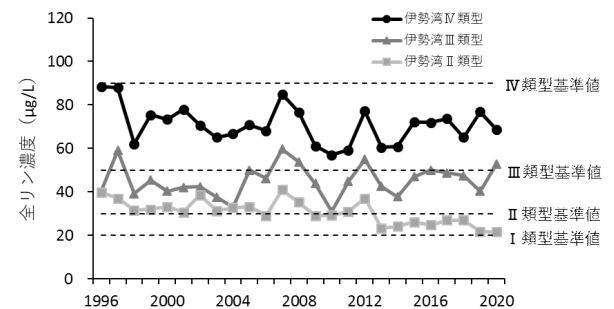
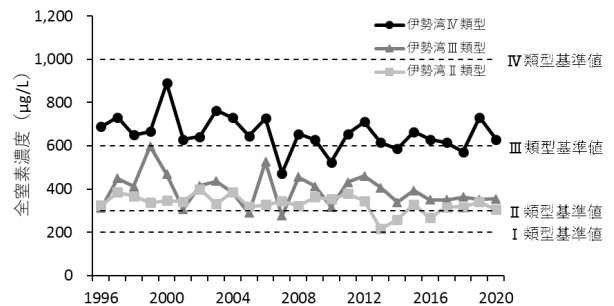


図7 伊勢湾における類型海域ごとのTN及びTPの濃度の推移

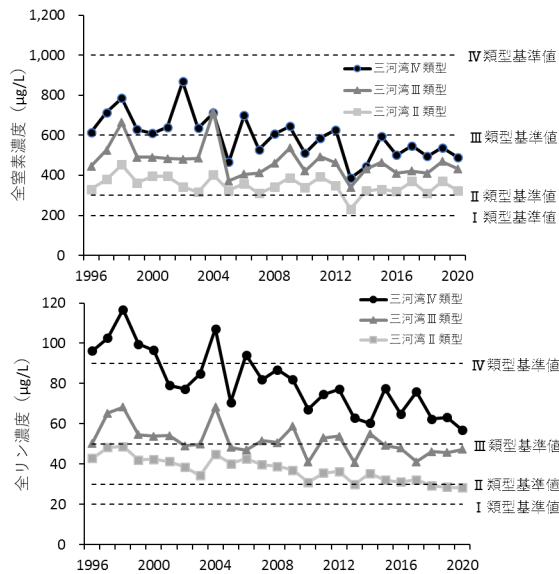


図8 三河湾における類型海域ごとのTN及びTPの濃度の推移

各類型海域のTN及びTPの推移を図7, 8に示した。近年は、伊勢湾及び三河湾のII類型海域のTN以外は概ね環境基準を下回っている。

そこで、三河湾のTPについて、海域へ河川の影響が出る河口域の表層、及び、夏季に海底からのリン溶出が生じる湾中央底層の変化を示すこととした。図9から、知多湾では一級河川である矢作川の河口域表層のK4-0と知多湾中央底層のK5-Bを比較した(図10)。全体に減少傾向にあり、1997年から2020年にかけての減少率はK4-0が50.6%、K5-Bが26.0%であり、矢作川河口域の減少率が知多湾中央底層より大きかった。知多湾では、陸域からのTP負荷の減少が著しく、湾中央のTP現存量も減少していた。渥美湾では一級河川である豊川の河口域表層のA10-0と渥美湾中央底層のA5-Bを比較した(図10)。1997年から2020年にかけての減少率は、A10-0が23.2%、A5-Bが27.6%であり、渥美湾中央底層の減少率が豊川河口

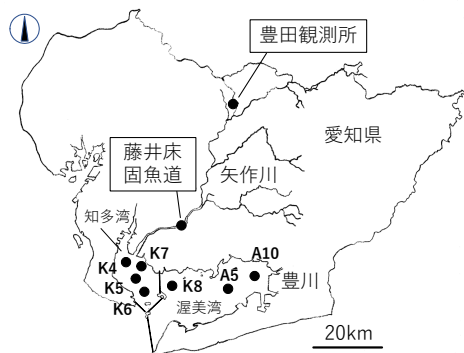


図9 知多湾(K)及び渥美湾(A)の水質調査測点、藤井床固魚道及び豊田観測所の位置

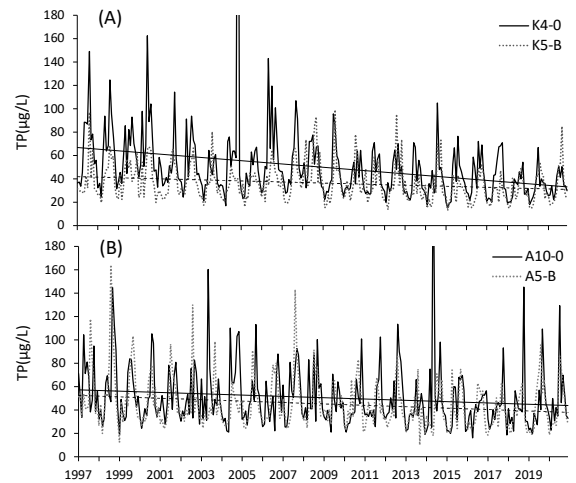


図10 TP濃度の推移, (A): 知多湾, (B): 渥美湾

域より大きかった。渥美湾では、知多湾ほどではないが陸域からの負荷が減少して湾中央のTP現存量が減少していた。

#### (4) 総量削減と海域濃度との関係

TP及びTNの実績負荷量と愛知県のII類型海域(図6)の平均濃度との関係を図11に示した。なお、実績負荷量は年度の合計、海域濃度は監視測点の当該年の各月平均を5月～翌年4月にかけて平均した。TPの海域濃度は実績負荷量と正の相関( $R=0.844, P<0.01$ )があり、削減した負荷量に対応して海域濃度は減少している。このように、人為的な削減が海域のTP濃度を低下させたことが

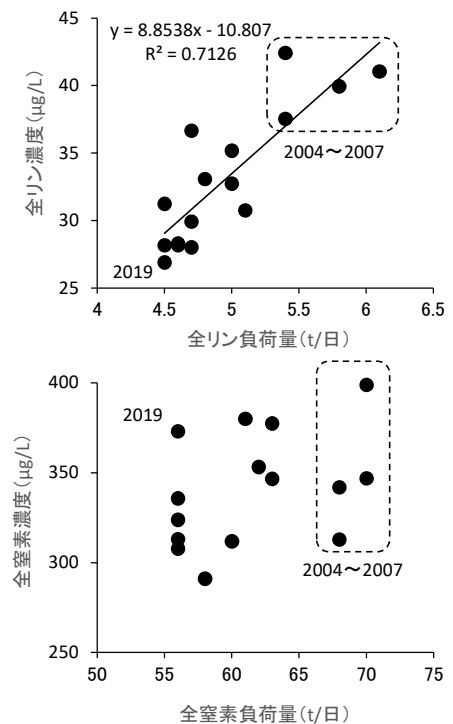


図11 全リン及び全窒素における実績負荷量とII類型海域の年間平均濃度の関係(2004~2019年)

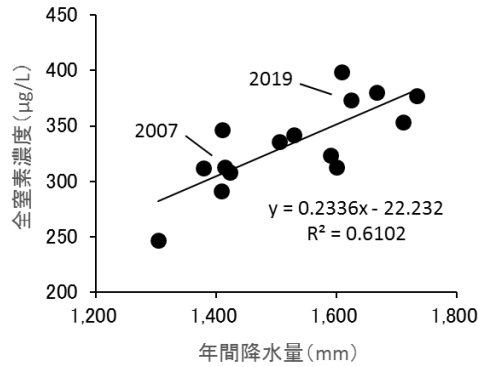
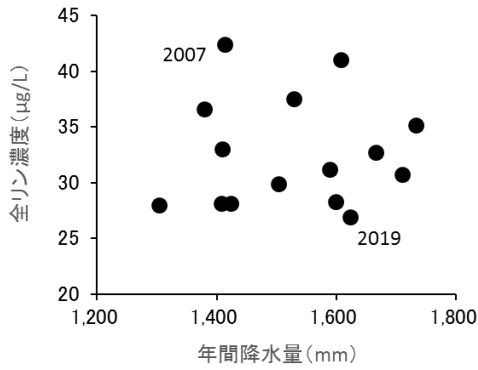


図 12 年間降水量とII類型海域の全リン及び全窒素の年間平均濃度との関係 (2004~2019年)

ら、海域の生産力の回復のためには人による供給が必要となる。全窒素の海域濃度は実績負荷量と相関関係がなく、負荷量が多かった 2004~2007 年度は海域濃度に 312.9~398.9 µg/L と幅があり、負荷量が少なかった 2019 年度においても海域濃度は 373.1 µg/L と高かった。そこで、愛知県の山間地域のほぼ中央に位置する豊田観測所 (図 9) の降水量とII類型海域の TP 及び TN の平均濃度との関係を図 12 に示した。降水量と TP の海域濃度は相関関係になかったが、降水量と TN の海域濃度は正の相関関係 ( $R=0.781, P<0.01$ ) にあり、その年の降水量がII類型海域の窒素濃度に影響を与えたと考えられた。海域の生産力を維持するためには、降水量が少ない年には TN の人為的な供給が必要である。

#### (5) 赤潮

伊勢湾・三河湾の赤潮発生の件数と延べ日数の推移を図 13 に示した。<sup>1,2)</sup>伊勢湾の発生件数は減少傾向にある。発生延べ日数は 2013 年にかけて減少した後 2017 年にかけて増加したが 2021 年にかけて再度減少している。三河湾の発生件数は横ばいである。発生延べ日数は 2011 年にかけて減少した後、2019 年にかけて増加したが 2021 年に再度減少している。

高密度になることにより貝類をへい死させる有害プランクトンであるヘテロカプサ (*H.circularisquama*) は、1998 年度以降では 2000 年度を除き 2016~2019 年度に高

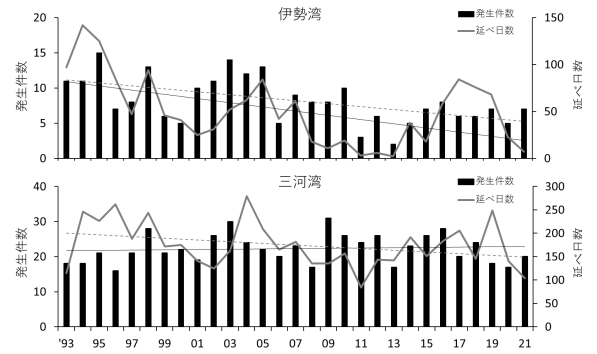


図 13 伊勢湾・三河湾の赤潮発生の件数 (実線の近似線) と発生延べ日数 (破線の近似線)

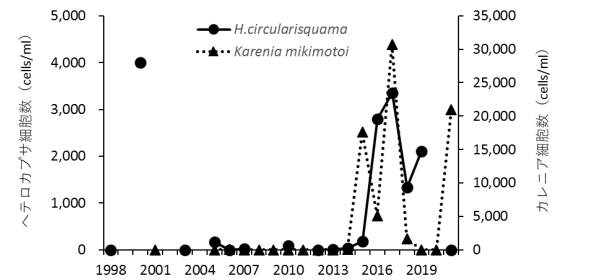


図 14 伊勢湾・三河湾におけるヘテロカプサ (*H.circularisquama*) 及びカレニア (*Karenia mikimotoi*) の年度別最高密度の推移

細胞数が確認された (図 14)。魚介類をへい死させる有害プランクトンであるカレニア (*Karenia mikimotoi*) は 2015 年度、2017 年度、2020 年度に高細胞数が確認されている。これらの有害プランクトンは渦鞭毛藻類であり、ヘテロカプサは無機態リン濃度が低い場合でも DOP (溶解態有機リン) が存在すればこれを利用し、利用できない種に対して優先的に増殖が可能とされている。<sup>1,3)</sup> 高温・高塩分を好む、<sup>1,3)</sup> 気象の影響を受けやすい増殖特性を持っており、夏季に降雨が少なかった 2016 年、2017 年は高細胞数を観測した。カレニアは無機態及び有機態の窒素、リンを利用することが可能であることから、栄養塩濃度の低い海域でも潜在的に増殖することが可能とされている。また、カレニアは 20 m に及ぶ日周鉛直移動を行い、嫌気条件下で濃度が高まる底層の栄養塩を利用することができる。<sup>1,3)</sup> 有害プランクトンの増殖は、1998 年から 2014 年にかけての伊勢湾・三河湾における窒素及びリンの濃度低下 (図 7, 8) で発生している。先行して、瀬戸内海では栄養塩の低下以降、これら有害プランクトンの発生が頻繁に確認されている。栄養塩が低い環境ではそれに適した生態系が構成されると想定されるが、伊勢湾・三河湾では栄養塩の低下が有害プランクトンの発生を招いていないかが危惧される。

#### (5) 貧酸素水塊

伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊面積 (7~9 月) の最大値

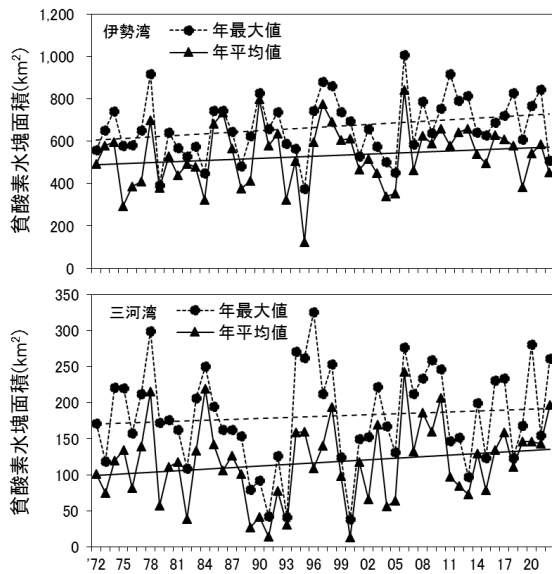


図 15 伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊面積の推移

及び平均値の推移を図 15 に示した。貧酸素水塊面積は伊勢湾、三河湾共に長期的に拡大傾向にある。また、伊勢湾の最大値は 2006 年以降高止まっている。三河湾は、2014 年以降、最大値、平均値共に拡大している。

1979 年以降、貧酸素水塊の縮小を目的に陸域からの負荷量を削減してきたが(図 5)、むしろ貧酸素水塊は拡大しており、貧酸素水塊の縮小への取り組み方を見直す時期にきていると考えられる。

1994 年には猛暑の影響で三河湾においてアサリの大量へい死が起き漁獲量が減少したが(図 1)、その後の 4 年間は貧酸素水塊の最大面積が 212.3 km<sup>2</sup> から 326.3 km<sup>2</sup> と高止まりの傾向にあった(図 15)。1994 年の前後 3 年の計 7 年間では、アサリ漁獲量と貧酸素水塊平均面積が負に相関にあった(図 16)。山本ら<sup>14)</sup>は、数値モデルによる解析を行い、アサリ資源量と貧酸素水塊面積には明確な負の相関が得られ、貝の資源量が貧酸素水塊の面積に及ぼす影響は大きいとしている。アサリの漁獲量が減少し始めた 2014 年の前後 3 年を含む計 7 年間も同様に、漁獲量と貧酸素水塊平均面積は負の相関にあった(図 16)。これらのことから、2014 年以降はアサリが減耗す

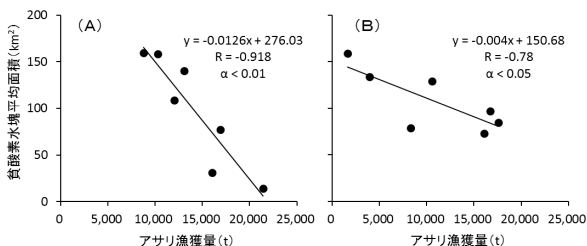


図 16 アサリ漁獲量と貧酸素水塊平均面積の関係

(A : 1991~1997 年, B : 2011~2017 年)

ることにより、水質浄化能力が低下して貧酸素水塊の面積が拡大した可能性が考えられた。貧酸素水塊面積の縮小には、水質浄化能力を有するアサリなど二枚貝類の資源回復が必要である。

### (6) 水温

水産生物の成育は水温の影響を受けることから、三河湾東奥部に位置する愛知県蒲郡市の月平均気温(気象庁蒲郡観測所)と三河湾 10 測点(A5,6,7,8,9,10,K4,5,6,7)の平均表層水温の推移を図 17 に示した。気温、水温共に 1997 年から 1998 年にかけて急激に上昇した。水温は気温の影響を受けているが、必ずしも 1 対 1 の関係ではない。1997 年度までの気温は上昇しているが水温は一定である。1998 年度以降は気温が若干低下傾向にあるものの水温は低下していない。これらの要因については、河川水や外海水の内湾への流入や潮流の変化などからの解析が待たれる。<sup>15)</sup>

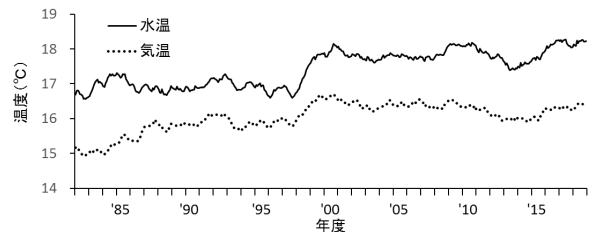


図 17 蒲郡市の月平均気温と三河湾 10 測点の平均表層水温(1 回/月観測)の推移(3 ヶ年移動平均)

## 3 水産生物の変化

### (1) アサリ

2009~2013 年のアサリ漁獲量は 1.6~1.8 万 t で(図 1)、生産額は 50 億円前後と海面漁業生産額の 20~32% を占めていた。しかし、2014 年は 1 万 t、30.5 億円、2015 年は 0.8 万 t、24.8 億円と減少して、2016~2020 年は 1.6~3.9 千 t、8.3~15.3 億円と海面漁業に占める割合は 6.6~9.4% に減少した。知多、西三河及び東三河の地区別漁獲量の推移によると、2009~2013 年は西三河地区が全体の 85.2% を占め、主要なアサリ生産地となっていた。そこで、西三河地区のアサリの生息状況の変化を見ることとした。

アサリの活力指標となる肥満度<sup>16)</sup>を 2 年毎に平均すると、1998-1999 年は減耗が起きる可能性がある肥満度 12<sup>17)</sup>を上回っていたが、2007-2008 年は 11 月から 1 月にかけて、2016-2017 年は 11 月及び 12 月に肥満度 12 を下回るようになった(図 18)。アサリが痩せることにより活力が低下して、少しの波浪でも減耗しやすくなっていると推測された。そこで、餌料環境を成長と再生産に



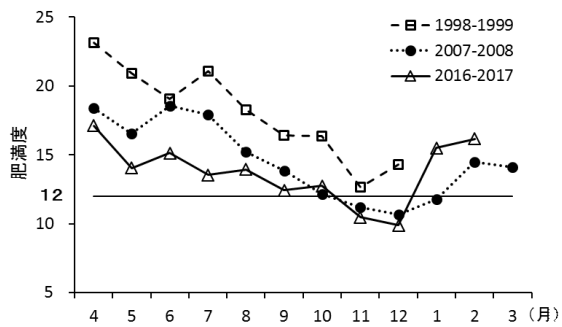


図 18 一色干潟におけるアサリ肥満度の推移

必要な環境と捉えて、植物プランクトン濃度と水温から構成するアサリ成長モデルを使用して解析を試みた。<sup>18)</sup>1998年から2017年にかけての水温は夏季に高く冬季に低くなる変動を繰り返して、年による大きな差はなかった(図19(A))。植物プランクトン量は2006年までは大きな振幅が見られたが、2007年以降は年間の最高値が低くなると共に振幅が小さくなった。(図19(A))1998~2006年の各年のアサリ軟体部乾重量の計算値は、生存に最低限必要な軟体部乾重量である0.128gDWを上回ったが、2007年以降は2009年及び2017年を除き、0.081~0.126gDWと生存に最低限必要な軟体部乾重量を下回った(図19(B))。年積算の生殖腺乾重量は1998~2006年は0.218~0.252gDWの変動範囲であったが、2007~2017年は0.140~0.197gDWと上限値、下限値ともに大きく低下した(図19(C))ことから、再生産への影響が危惧された。2014~2021年の三河湾のアサリ浮遊幼生密度は、2000~2008年と比較して1オーダー程度の減少が確認されている。<sup>19)</sup>アサリの育成を確保するためには、アサリの餌料となる植物プランクトンは1998~2006年の発生量を確保する必要がある。伊勢湾東部小鈴谷干潟におい

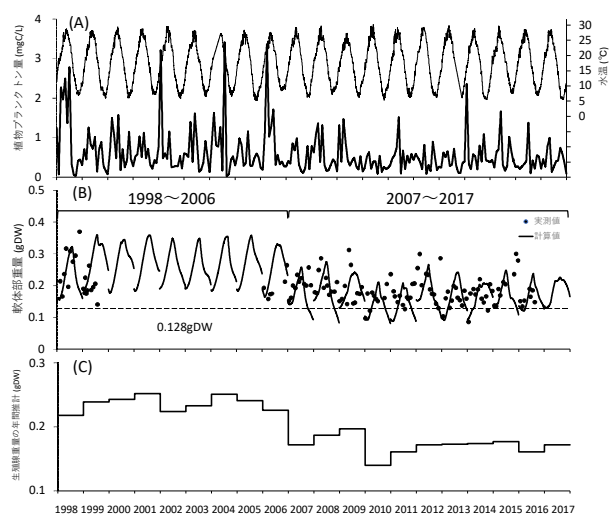


図 19 西三河地区の植物プランクトン量及び水温 (A)、アサリ軟体部重量の計算値及び実測値 (B)、アサリ生殖腺重量の年間累計 (C) の推移

ても、2014年春季にアサリ資源の急激な減耗が起き、その後も資源量低下が継続しているが、植物プランクトン量の低下による生理的死亡の可能性が報告されている。<sup>20)</sup>服部ら<sup>21)</sup>は、肥満度及び個体数密度の水平分布から、両者には有意な正の相関があり、アサリの資源形成には肥満度が関係していることを示している。経年的な餌料濃度の低下が軟体部重量の低下(=肥満度の低下)を招き、資源量の減少が生じたと考えられる。また、餌料不足になりアサリの肥満度が低下すると、潜能能力が低下して波浪に耐えられずにへい死する。自然発生及び移植した稚貝の保護対策として、潜砂行動に影響を与える波浪を軽減するための砕石覆砂試験<sup>22)</sup>や波浪を取り入れたアサリ成長モデル<sup>23)</sup>によるその効果算定が進められている。

## (2) ノリ

野菜の栽培に肥料が必要なように、ノリの生長には $PO_4\text{-P}$ やDIN等の栄養塩が必須である。知多湾表層における $PO_4\text{-P}$ とDINの平均濃度の変化を図20に示した。 $PO_4\text{-P}$ 及びDINの濃度はいずれも夏季は低く、秋季に上昇してそれ以降は徐々に低下している。2013~2017年度の $PO_4\text{-P}$ 及びDINの月平均濃度は、1997~2012年度と比較して秋季のピーク濃度が低く、早くも1月には良いノリの目安となる $10\mu\text{g/L}$ 及び $100\mu\text{g/L}$ <sup>24)</sup>を下回った。このように、 $PO_4\text{-P}$ 及びDINの栄養塩が早期に低下することにより、生産の早期終了や単価の低下を招く色落ちが発生する漁業被害となっている。<sup>25)</sup>また、柵当たりの乾ノリ生産枚数を向上させるためには、10月の育苗期までに十分なリン酸態リンを漁場に供給することが重要

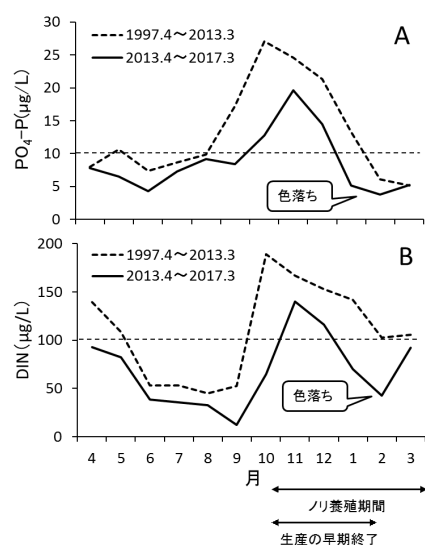


図 20 知多湾表層 (K4,5,6,7) における  $PO_4\text{-P}$  (A) 及び DIN (B) の平均濃度の変化、品質の良いノリに必要な濃度  $PO_4\text{-P}$  :  $10\mu\text{g/L}$ 、DIN :  $100\mu\text{g/L}$

であることが示されている。<sup>26)</sup> 通常、秋雨前線等による降雨で河川から栄養塩が供給されること、及び夏季の成層期に海域下層に蓄積された栄養塩が秋季の上下混合期に供給されることで、秋季に表層の栄養塩が高くなる。しかし、長期的に矢作川河口域の PO<sub>4</sub>-P 及び DIN が低下しており、陸域から供給される栄養塩が減少している。K4 における近似線では、1997 年度から 2016 年度にかけて、PO<sub>4</sub>-P は 56.5%、DIN は 68.3% 減少した (図 21)。また、PO<sub>4</sub>-P は低酸素濃度下で底泥からの溶出が促進されるが、<sup>27)</sup> 図 22 の底層の DO と PO<sub>4</sub>-P の関係が示すように、2013 年度以降は夏季成層期の底層において DO 濃度が低い状態でも PO<sub>4</sub>-P の濃度が減少しており、三河湾全体で栄養塩が減少していることがうかがえた。<sup>28)</sup>

ノリ生産期間の目安となる共販への最終出荷回次数を沿海の鬼崎漁協から吉田漁協までの 14 漁協 (支所を含む) を平均した。1999~2002 年度は平均 9.8 回次であったが、2003~2017 年度は 9.1 回次となり、大規模な色落ちが発生した 2018 年は 8.8 回、2021 年は 8.3 回となった。10 回次近くまで出荷されていた年代は、色落ちが発生し

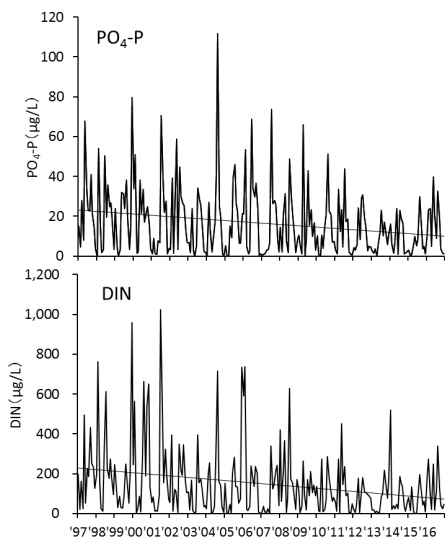


図 21 K4-0 における PO<sub>4</sub>-P 及び DIN の濃度の推移

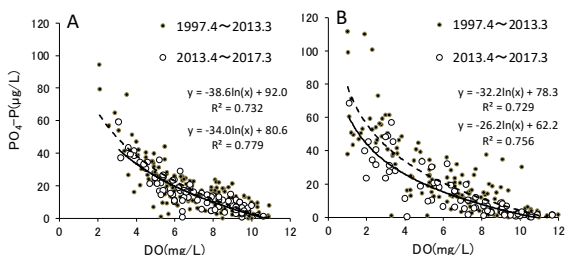


図 22 K5 (A) 及び A5 (B) の底層 (水深-1m) における溶存酸素量 (DO) と PO<sub>4</sub>-P 濃度の関係の期間別比較

ても降雨による河川からの栄養塩供給でノリの色調が回復した。近年は、栄養塩不足で色落ちが発生すると、降雨があったとしても栄養塩の回復がないままノリの色が戻らず、生産が終了する傾向にある。ノリ養殖の生産力を回復するために必要なことは、漁期終了まで生産が続けられる栄養塩の確保である。漁期後半の高等級ノリの構成割合は、その年の海域の栄養塩濃度の動向をよく反映しており、栄養塩濃度管理を実施する上で有益な指標であることが示されている。<sup>29)</sup> 漁期を賄う秋季の栄養塩濃度の確保や漁期終盤の栄養塩の供給を計画的に管理する時期に来ている。

### (3) イカナゴ

イカナゴ漁は、2022 年時点で 2016 年以降 7 年連続して禁漁となっている。イカナゴは、6 月下旬から 12 月上旬に伊勢湾口域の砂地で夏眠する。<sup>30)</sup> 夏眠の理由は、代謝特性及び食害による減耗に対応するためと推測されている。<sup>31)</sup> 夏眠中に摂餌しないまま 11 月から成熟し始め、12 月中旬に遊泳行動を開始した後 1 月上旬に産卵する。このため、翌年の再生産の良否は、6~7 月の夏眠前の栄養状態がとても重要になる。<sup>31)</sup> 山本は、<sup>32)</sup> 貧栄養化のプロセスでは、栄養塩レベルと動物プランクトンバイオマスは変化せず、植物プランクトンバイオマスと魚類バイオマスが減る。つまり、陸域からの流入負荷を削減すれば、赤潮発生件数は減るが、魚類の漁獲量も減少するとしている。そこで、図 23 に海域の基礎生産の指標となる伊勢湾・三河湾のクロロフィル a 濃度が変化した 2007 年前後<sup>33)</sup> を境とした 2 つの年代で、クロロフィル a 平均濃度とイカナゴ肥満度の月別推移を示した。5~11 月のクロロフィル a 平均濃度は、近年大きく低下した。イカナゴの肥満度は 4 月から 12 月まですべての月で近年の方が低く、特に産卵前の 9 月や 11 月の低下が目立っている。また、夏眠期間中の生残、成熟、その後の産卵を安定して乗り切るための夏眠開始時の肥満度閾値は、

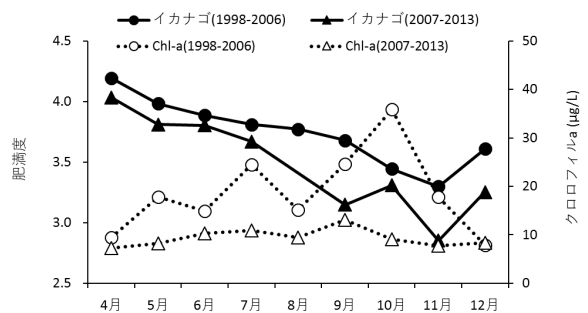


図 23 年代別のイカナゴの肥満度と伊勢湾・三河湾 14 測点 (A5,7,8,9,14,K4,5,6,7,8,N4,5,6,7,8,9,12,13,15) のクロロフィル a 平均濃度の月別変化



個体サイズにより異なるが、4.2~4.5を目安としている。<sup>31, 34)</sup>特に、2007~2013年の6月の肥満度は3.8と目安を下回っている。海域の基礎生産を支える植物プランクトン濃度の低下はイカナゴの生息状況に影響を与えていると推測される。夏眠中の個体や産卵による再生産が維持可能な肥満度への回復の目途が立たないと資源量は戻らない可能性があるため、今後の研究が期待される。

#### (4) イワシ類

伊勢湾・三河湾で漁獲されるイワシ類は、マイワシとカタクチイワシが中心である。両種の資源量は数十年規模で大きく変動し、魚種交代することが知られている。<sup>35)</sup>両種は動物プランクトンを摂餌するが、マイワシ成魚は珪藻類も摂餌する。<sup>36)</sup>山本の理論に基づき、<sup>32)</sup>動物プランクトンの餌となる植物プランクトンとイワシ類漁場の分布を比べた。<sup>37)</sup>2018年は7~9月の三河湾内の植物プランクトン濃度が7.6~11.9 µg/Lと低く推移したことから餌不足となり、6月に渥美湾西部に形成された漁場が湾奥へ拡大しなかったと推測された。2019年は7~9月のクロロフィルa平均濃度が15.6 µg/Lと2018年の9.4 µg/Lに比べ1.7倍高かったことから、三河湾口部から渥美湾中部に漁場が拡大したと推測された。さらに、10月のクロロフィルa濃度の分布図によると(図24)、10 µg/L以上の高濃度の範囲が渥美湾奥部に収束したことから、渥美湾に加入した魚群が植物及び動物プランクトンを求めて渥美湾奥部にまで入り込んだと推測された。このように、渥美湾への加入及び湾奥部への入り込みなどの漁場形成には、クロロフィルa濃度10 µg/L程度が目安となっていた。このように、2018年及び2019年の2年間の調査では、1998~2006年と比較して湾全体でクロロフィルa濃度が低下していること、及び、高濃度の範囲が湾奥部に収束していることが、イワシ類の漁場形成に影響を与えている可能性が推測された。ただし、操業から導く漁場形成については、その年の資源管理方針や

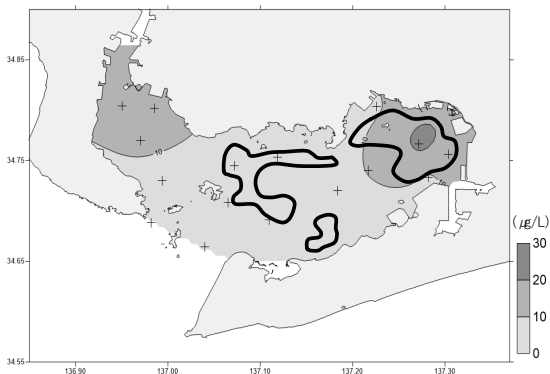


図24 2019年10月のイワシ類漁場(太実線)とクロロフィルa濃度の分布

魚価の動向など人為的な要素にも左右されることにも注意が必要である。

#### (5) シャコ・アナゴ

底びき網漁業の代表的な漁獲対象種であるシャコ、アナゴは、近年漁獲量が減少している。シャコは肥満度の低下が生残率の低下を招いている。<sup>38)</sup>また、曾根ら<sup>39)</sup>は、小型甲殻類等の餌料生物資源の減少に伴いマアナゴの摂餌量が減少し、肥満度の低下を招き、マアナゴ資源量が減少している可能性を示唆している。シャコの肥満度の低下やマアナゴの餌料生物の減少については夏季を中心とした基礎生産力の低下によるボトムアップ効果の影響を受けている可能性がある<sup>38)</sup>ことから、海域の基礎生産力を回復させるための栄養塩環境の修復が必要となる。

#### (6) アユ

矢作川中流域でふ化したアユ仔魚は、10~12月に川を下り、翌年3~5月にかけて川を遡上し始めるまで三河湾沿岸で成長する。アユ仔魚はかいあし類を中心とする動物プランクトンを摂餌する。<sup>40)</sup>そこで、山本の理論により、<sup>32)</sup>2009年~2016年の植物プランクトン量の指標となる海域のクロロフィルa濃度と矢作川藤井床固め魚道(図9)で採捕した天然遡上アユ稚魚の採捕量<sup>41)</sup>の年毎の推移及び関係を図25に示した。クロロフィルa濃度は、1~3月の矢作川河口部沿岸K,5,6,7,8(図9)の表層値(1回/月観測)を平均した。<sup>42)</sup>アユ稚魚の採捕量はクロロフィルa平均濃度を追従しており、正の相関関係が得られた( $p < 0.05, R = 0.821$ )。アユ稚魚採捕量は、

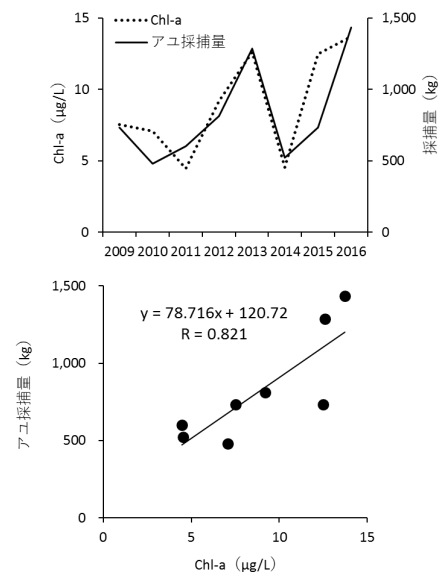


図25 1~3月のクロロフィルa平均濃度(K5,6,7,8)とアユ採捕量の年毎の推移(上段)及び関係(下段)

冬季に海域に発生する植物プランクトン濃度に影響を受けていたと推測された。そのため、アユ資源量の確保には1~3月の海域の植物プランクトンの生産力が重要である。なお、天然遡上アユ採捕量は、資源量の一部を切り取って観察していることから、観測の継続と資源量と餌料との関係の今後の解析に期待する。

### 3 下水道管理運転の効果

愛知県漁業協同組合連合会から「伊勢湾および三河湾は漁業生産に必要な栄養塩類が低下しており、所要の措置を講ずること」との要望が出されたことから、愛知県は2017年度から三河湾に排水している矢作川及び豊川の2ヶ所の広域流域下水道(図26)から放流するリンを秋季から春季までの期間、排水規制基準内で増加する試験運転を実施している。

愛知県の排水規制基準により、リンの排水濃度上限は1mg/Lとなっている。そのため、試験開始前の2016年度と比較して、試験期間は矢作川浄化センターからはこれまでの約4倍、豊川浄化センターからはこれまでの約2倍の濃度となる同じ0.8mg/Lを目標としてリンが放流された。

試験の実施期間は、2017年度が11~3月、2018、2019年度が10~3月、2020、2021年度が9~3月であった。2022年度も9月から実施されている。一例として、2016年度及び2020年度の放流濃度の推移を図27に示した。



図26 矢作川浄化センター及び豊川浄化センターの放流口周辺に設けた水質調査測点

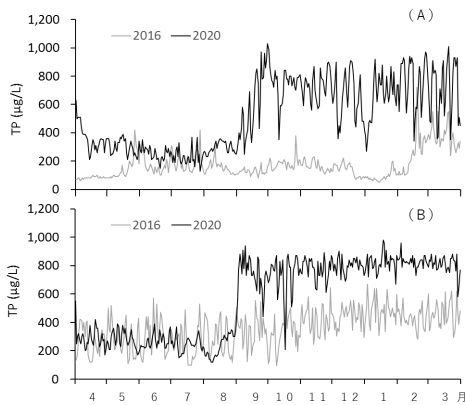


図27 矢作川浄化センター(A)及び豊川浄化センター(B)における2016年度及び2020年度のリン放流濃度の推移

各浄化センターの放流口周辺に測点を設けて水質観測を行った(図26)。また、アサリ、ノリについても試験区を設けて効果の把握を行った。5年間の主な放流効果は以下のとおりである。

- ① 両浄化センター放流口から海域に向けて、リンが拡散した。<sup>43, 44)</sup> 5ヶ年平均で、矢作川浄化センターでは約3km沖合、豊川浄化センターでは約1km沖合まで周辺より高い濃度の範囲が広がった(図28)。<sup>44)</sup>
- ② リン増加試験中の放流水は、試験前と比較して全リンに占めるリン酸態リン(植物が直接利用できる形態)の割合が高かった。<sup>43)</sup> 2018年度の矢作川浄化センターでの割合は、試験開始前の8,9月の平均69.2%から試験中の10~3月には平均79.6%に上昇して、試験運転後の4月4日には4.3%に低下した。豊川浄化センターの割合

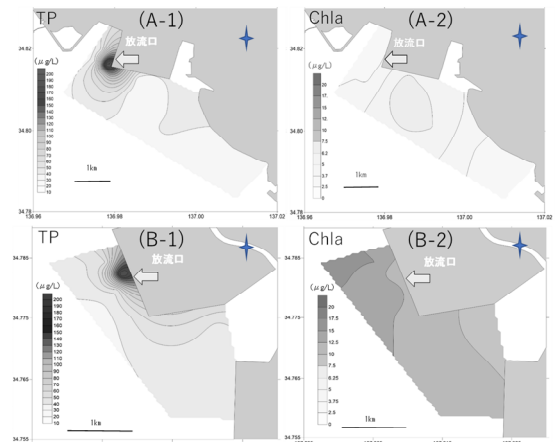


図28 矢作川地区(A)及び豊川地区(B)におけるTP濃度(-1)及びクロロフィルa濃度(-2)の分布(2017-2021年の5ヶ年平均)

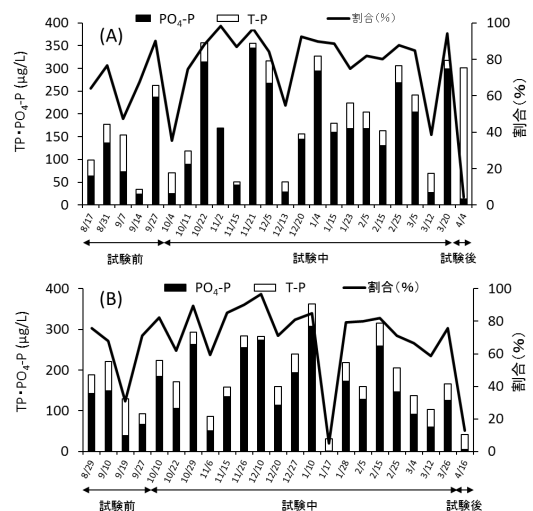


図29 2018年度の矢作川浄化センター(A)と豊川浄化センター(B)の放流口直近のTP濃度とPO4-P/TPの推移

は、試験開始前の8,9月の平均61.4%から試験中の10~3月には平均73.3%に上昇して、試験運転後の4月16日には12.8%に低下した。また、試験運転中においても、全リン濃度が低下すると割合も低下した(図29)。<sup>45)</sup>

③ リンが拡散した先で、植物プランクトン量の指標となるクロロフィルa濃度が増加した(図28)。<sup>43, 44)</sup> 海域に拡散したリン及び窒素が基となり、植物プランクトンが発生したと推測された。

④ ノリの色調は、放流口に近い場所が離れた場所より正常な色調が維持できており(図30)。<sup>44)</sup> 試験放流の効果と推測された(矢作川浄化センター)。

⑤ ノリ養殖期間中、栄養塩の低下により、軽度の色落ちが発生したが、ノリの色調は放流口に近い方が離れた場所より、早く、良好に回復した(矢作川浄化センター)(図31)。<sup>46)</sup>

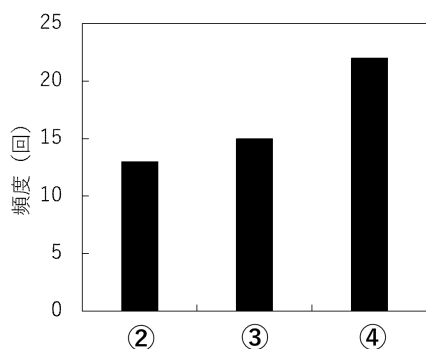


図30 矢作川地区の2017~2021年度ノリ漁期の観測においてノリ葉体の色調(L\*値)が49.5以上(色落ちの目安)であった頻度

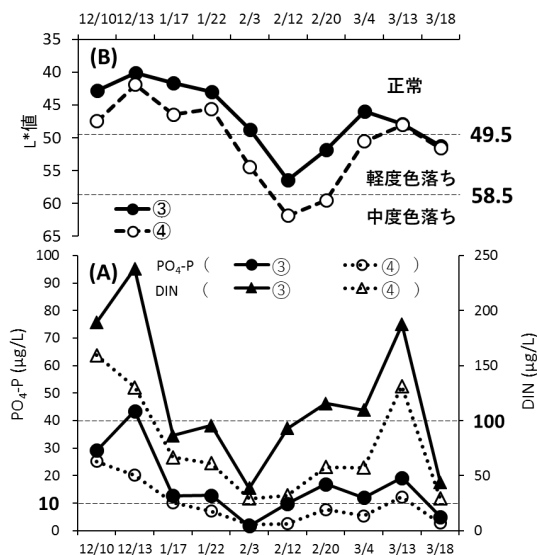


図31 2019年度ノリ漁期における栄養塩濃度(A)とノリ葉体の色調(L\*値)(B)の推移, 良い品質のノリに必要な栄養塩の目安(PO<sub>4</sub>-P:10μg/L, DIN:100μg/L)

⑥ 放流口に近い漁場ほど乾海苔の窒素安定同位体比(δ15N:下水処理水中の溶存態無機窒素は、処理過程で質量数の軽い窒素(14N)が大気中に放出されやすいため、大気窒素より15Nの存在割合が高くなる。)が高く、放流水の効果と推測された(矢作川浄化センター)。<sup>47)</sup>

⑦ 放流口に近い試験区のアサリは、離れている場所のアサリより肥満度が高く(図32)、現存量が大きかった(図33)。<sup>44)</sup> また、10月から試験を開始した2018-2019年度より、1ヶ月前倒して9月から試験を開始した2020-2021年度の方が、餌となる植物プランクトンの発生を促し、アサリの生存に好影響を与えた可能性がある(矢作川浄化センター)(図33)。<sup>44)</sup>

⑧ 増加放流されたリンを基に発生したナノ・ピコプランクトンが、秋季の豊川河口域のアサリ着底稚貝の生存を促した。ナノ・ピコプランクトンの発生量と着底稚貝の生息密度に正の相関関係があった(図34)。<sup>48)</sup> また、植物プランクトンの供給増により、1歳稚貝の秋冬季の生残率が向上した(豊川浄化センター)。<sup>48)</sup>

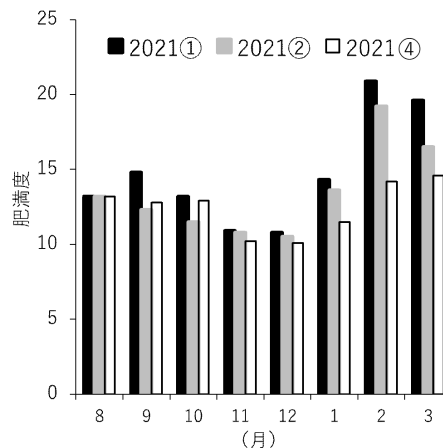


図32 2021年度の矢作川地区アサリ肥満度の推移

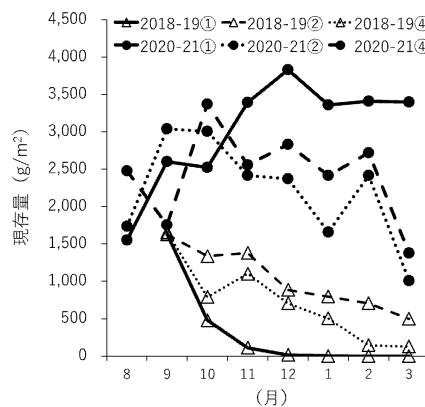


図33 2018~2019年度(10月から試験運転)及び2020~2021年度(9月から試験運転)のアサリ現存量の推移

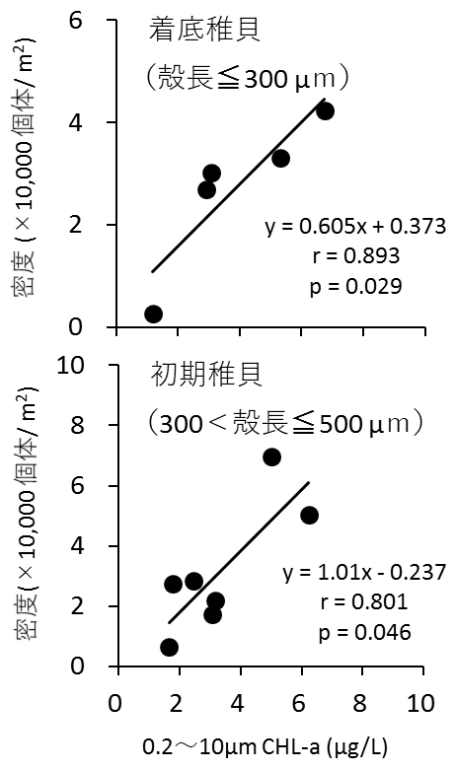


図34 0.2~10 μm サイズのクロロフィルa濃度とアサリ着底稚貝密度との関係

⑨ 試験運転中の浄化センターからのリン負荷量は、河川からの負荷量と同等かそれを上回る値となり、<sup>43)</sup> 生物生産に重要な役割を果たしていると推測された (図35)。

西三河地区のアサリ漁獲量は、2018年が109 tであったが、2021年は930 tと回復の兆しが見えている。矢作川及び豊川の広域流域下水道において、国の排水規制基準を上限とする濃度(県の2倍となる濃度、窒素:20 mg/L、リン:2 mg/L)で、2022年度は11月から3月まで、2023年度は9月から3月まで放流が行われる計画となっている。また、伊勢湾東部についても、日光川下流浄化センター、知多市南部浄化センター、東海市浄化センター、常滑市常滑浄化センターにおいて県の排水規制基準を上

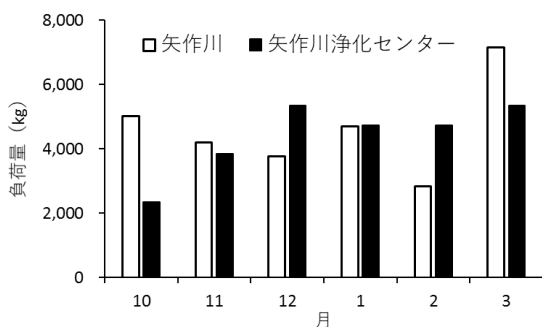


図35 2017年度における矢作川及び矢作川浄化センターの月別負荷量の推移

限とするリンの試験運転が2022年12月以降、2023年3月にかけて計画されている。今後、海域の生物生産力の向上が期待される。

#### 4 豊かな海のために、そして

海域の富栄養対策として負荷量が削減された結果、デンマーク沿岸では1990年代以降、窒素が約50%、リンが約56%削減され、それに伴いクロロフィルa量は減少した。透明度はやや改善したが、大型底生動物の生物量のうち懸濁物食者が劇的に減少した。<sup>49)</sup> 伊勢湾・三河湾の状況もこれとよく似ている。アサリ等懸濁物食者の回復には、沿岸域の窒素及びリンの濃度の適切な確保が重要となる。

アサリの主生産地であった西三河地先海域では、アサリの成育状況は、生存可能であった1998~2006年、生存限界を下回るようになった2007~2017年に分けられた (図19)。1998~2006年、2007~2017年のTP及びTNの濃度の年間平均は、各々46.3 μg/L、36.4 μg/L、及び、391.3 μg/L、338.0 μg/Lと全て環境基準Ⅲ類型(水産2種) (表1)の範囲内で減少を示した。アサリ軟体部乾重量が低下した2007年以降のクロロフィルa濃度の変化は餌料摂取の過速度が速い6~11月に表れており、アサリ資源の維持のためには6~11月に1998~2006年の平均22.3 μg/L程度のクロロフィルa濃度の維持が必要である。そこで、2期間の6~11月の栄養塩濃度を比較した。6~11月のTPの平均濃度は1998~2006年が56.5 μg/LでⅣ類型の範囲(表1)、2007~2017年が45.2 μg/LでⅢ類型の範囲(表1)にあった。一方、6~11月の1998~2006年及び2007~2017年のTNの平均濃度は、各398.6 μg/L及び362.3 μg/Lと全てⅢ類型(表1)の範囲にあった。<sup>18)</sup> このように、6~11月のTP濃度はⅣ類型とⅢ類型の幅の中で、TN濃度はⅢ類型の幅の中でアサリの成育に影響し得る濃度変化が生じていた。アサリを保全すべき水産対象種とした場合、TP濃度は年平均ではⅢ類型であっても過摂食が活発となる6~11月はⅣ類型を確保することが重要であり、またTN濃度は今後Ⅲ類型への環境基準の見直しや区分について検討する必要があると考えられた。水産用水基準では、アサリはⅣ類型(水産3種)、イワシ類はⅢ類型及びⅣ類型、シヤコはⅢ類型の水産生物として当てはめられている。<sup>11)</sup> 海域の生物生産力を回復するためには、1998~2006年の植物プランクトン発生量を確保する必要がある。<sup>18)</sup> これに必要なリンの海域濃度を確保するためには、2006年の陸域からの実績負荷量5.4 t/日が当面の目標値と考えられる。

今後も、陸域からの負荷、海域での生物生産、漁業に

よる海域からの窒素，リンの取り上げを通じて，太く滑らかな物質循環がバランスを取りながら展開されることを期待する。そのため，干潟・浅場造成を始めとする生物生産の場の保全及び再生は重要となる。干潟・浅場では，炭素を含む多くの二枚貝類及びその貝殻が埋在している。藻場が減少している昨今，この太く滑らかな循環が起動するための下水道濃度管理運転に，地球温暖化の原因とされる炭素の在り方を考えるヒントがあるのかもしれない。

## 謝 辞

教えられ，考えさせられ，締め切りに追われ，それでもワクワクを感じながら研究報告と共に歩んできました。海域で捉えた現象を整理して表現する大切さを教えていただいたように思います。支えていただいた漁業関係者，大学，国の研究機関，調査会社及び水産試験場の皆様に感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

## 文 献

- 1) 平成 22 年度「海の健康診断」を活用した三河湾の極小海域における環境評価手法の調査研究報告書 (2011)，海洋政策研究財団 (財団法人シップ・アンド・オーシャン財団)，愛知県水産試験場。
- 2) 蒲原聡 (2014) 愛知県豊川河口域に発生するアサリ稚貝の移植。豊かな海，33，44-51。
- 3) 山田久 (2017) 環境基準のあり方と豊かな漁業生産，海洋と生物，233，594-602。
- 4) 昭和 46 年度公共用水域の水質測定に関する計画に基づく水質調査結果 (1971)，愛知県。
- 5) 平成 8 年度公共用水域及び地下水の水質調査結果 (1996)，愛知県。
- 6) 水質総量削減，愛知県，<https://www.pref.aichi.jp/soshiki/mizutaiki/0000047072.html> (2023 年 1 月時点)。
- 7) 水環境総合情報サイト，広域総合水質測定データ (水質)，環境省，<https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/mizu/download/download.asp> (2022 年 11 月時点)。
- 8) 青山裕晃・蒲原聡 (2022) 伊勢・三河湾の年代別栄養物質濃度の水平分布について。愛知水試研報，27，37-40。
- 9) 発生負荷量管理等調査，環境省，<https://www.env.go.jp> (2022 年 11 月時点)。
- 10) 2019 年度公共用水域及び地下水の水質調査結果 (2020)，愛知県。
- 11) 公益社団法人日本水産資源保護協会 (2018) 「水産用水基準」，公益社団法人日本水産資源保護協会，東京。
- 12) 平成 5 年～令和 3 年伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況，愛知県。
- 13) 今井一郎・山口峰生・松岡敷充 (2016) 有害有毒プランクトンの科学。恒星社厚生閣，東京，175-200。
- 14) 山本祐也・中田喜三郎・鈴木輝明 (2008) 三河湾における貧酸素水塊形成過程に関する研究。Journal of Advanced Marine Science and Technology Society，14(1)，1-14。
- 15) 蒲原聡 (2020) 豊かな内湾環境を実現するモニタリング調査と栄養塩のあり方-伊勢・三河湾を例として-。海洋と生物，42(1)，16-24。
- 16) 鳥羽光晴・深山義文 (1991) 飼育アサリの性成熟過程と産卵誘発。日水誌，57，1269-1275。
- 17) 水産庁 (2008) 干潟生産力改善のためのガイドライン，97。
- 18) 蒲原聡，芝修一，鶴島大樹，鈴木輝明 (2021) 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の育成と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連。水産海洋研究 85(2)，69-78。
- 19) 村田将之・日比野学・長谷川拓也・宮川泰輝・松村貴晴・岡本俊治・黒田伸郎 (2023) 三河湾におけるアサリ資源の減少に伴う浮遊幼生出現状況の変化。愛知水試研報，28，20-31。
- 20) 芝修一・姫野天領・吉田司・蒲原聡・田中義人・鈴木輝明 (2020) 個体成長モデルを用いた伊勢湾東部沿岸域におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* 資源の減耗要因の検討。水産海洋研究，84(1)，11-26。
- 21) 服部宏勇・松村貴晴・長谷川拓也・鈴木智博・黒田拓男・和久光靖・田中健太郎・岩田靖宏・日比野学 (2021) 愛知県内アサリ漁場における秋冬季のアサリ肥満度の変動と減耗。愛知水試研報，26，1-16。
- 22) 日比野学・松村貴晴・服部宏勇・長谷川拓也・阿知波英明・石樋由香・三輪正毅 (2021) 三河湾におけるアサリの漁場造成手段としての碎石覆砂の効果と環境要因との関連。愛知水試研報，26，17-30。
- 23) 芝修一・姫野天領・大嶋真謙・濱田孝治・中村憲司・吉田司・蒲原聡・田中義人・鈴木輝明 (2022) 三河湾東奥部の河口干潟 (六条潟) におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* 個体群の変動機構。水産海洋研究，86(1)，1-18。
- 24) 愛知県水産試験場 (2004) ノリ養殖テキスト，80pp。
- 25) 蒲原聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・天野禎也 (2020) 2018 年度ノリ漁期において伊勢・三河湾で生



- 産された乾海苔の黒み度への漁場の栄養塩類の影響.  
愛知水試研報, 25, 1-8.
- 28) 川村耕平 (2023) 西尾市沿岸域におけるノリの秋芽網生産とリン酸態リン濃度の関係. 愛知水試研報, 28, 32-34.
- 27) 本田是人・戸田有泉・二ノ方圭介・中嶋康生・鈴木輝明 (2015) 三河湾における水質環境と貧酸素水塊の変動. 水産海洋研究, 79(1), 19-30.
- 28) 蒲原聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・天野禎也 (2018) 三河湾における栄養塩の低下. 愛知水試研報, 23, 30-32.
- 29) 川村耕平 (2022) 2014 年度-2018 年度漁期に西尾市沿岸域で生産された乾ノリの等級区分の構成割合について. 愛知水試研報, 27, 34-36.
- 30) 中村元彦・船越茂雄・向井良吉・家田喜一・石川雅章・柳橋茂昭 (1997) 伊勢湾産イカナゴの夏眠場所. 愛知水試研報, 4, 1-9.
- 31) 柳橋茂昭・船越茂雄・向井良吉・中村元彦 (1997) 伊勢湾産イカナゴの夏眠期における生き残り と成熟, 産卵機構. 愛知水試研報, 4, 23-31.
- 32) 山本民次 (2014) 瀬戸内海西部海域における貧栄養化. 沿岸海洋研究, 52(1), 49-58.
- 33) 鈴木輝明 (2017) 沿岸環境の再生・創造と豊かな漁業生産—伊勢・三河湾を例として—. 海洋と生物, 39(6), 554-563.
- 34) 山田浩且・久野正博・池田正・石川貴朗 (1994) 資源管理型漁業推進総合対策事業-III, 管理計画策定調査. 平成 5 年度三重県水産技術センター事業報告, 73-78.
- 35) 高須賀明典・大関芳沖・黒田寛・奥西武 (2015) 海洋生態系間比較から見る黒潮海流域における小型浮魚類の資源変動と生物特性. 79(4), 352-374.
- 36) 平成 30 年度魚種別系群別資源評価(50 魚種 84 系群), abchan.fra.go.jp/digests2018/index.html(2020 年 1 月時点).
- 37) 蒲原聡・大澤博・小柳津賢吾・袴田浩友・古橋徹・久田昇平 (2021) 三河湾における 2018 年, 2019 年のレーダー画像解析によるイワシ類漁場と海洋環境との関係. 愛知水試研報, 26, 52-55.
- 38) 曾根亮太・日比野学・下村友季・鶴寄直文・澤山周平 (2022) 伊勢・三河湾におけるシャコの資源動態と肥満度の変化及び加入・生残過程. 愛知水試研報, 27, 22-30.
- 39) 曾根亮太・日比野学・下村友季・鶴寄直文・横内一樹 (2022) 伊勢・三河湾におけるマアナゴの資源動態と肥満度, 胃内容物組成及び餌料環境の変化. 愛知水試研報, 27, 1-9.
- 40) 浜田理香・木下泉 (1988) 土佐湾の砕波帯に出現するアユ仔稚魚の食性. 魚類学雑誌, 35(3), 382-388.
- 41) 中嶋康生 (2023) 矢作川における天然遡上アユ経年変化. 令和 3 年度愛知水試業務報告, 40-41.
- 42) 平成 21~28 年度公共用水域及び地下水の水質調査結果(2009~2016), 愛知県.
- 43) 蒲原聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・天野禎也・石田俊朗・宮脇大・鈴木智博 (2019) 2017 年から 2018 年の三河湾における 2 ヶ所の広域流域下水道の冬季リン管理運転が湾奥部の水質に与えた影響. 愛知水試研報, 24, 1-13.
- 44) 柘植朝太郎・加藤毅士 (2022) 伊勢・三河湾における年代別栄養塩類と対応. 第 17 回伊勢・三河湾の環境と漁業を考える, 水産海洋研究地域研究会公演要旨集, 6-9.
- 45) 蒲原聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・矢澤孝・宮脇大・鈴木智博・二ノ方圭介・松村貴晴・平井玲・服部宏勇・小椋友介・長谷川拓也 (2020) 下水道の栄養塩増加運転に係る効果調査. 令和 2 年度愛知水試業務報告, 79-81.
- 46) 蒲原聡・松村貴晴・湯口真実・松井紀子・天野禎也・石井亮・矢澤孝・宮脇大・鈴木智博・二ノ方圭介・日比野学・服部宏勇・長谷川拓也 (2021) 下水道の栄養塩増加運転に係る効果調査. 令和元年度愛知水試業務報告, 88-90.
- 47) 中島広人・西本篤史・谷川万寿夫・日比野学 (2023) 三河湾西部で生産された乾海苔の窒素安定同位体比の特徴—栄養塩供給源の推定に関する予察的検討—. 愛知水試研報, 28, 38-40.
- 48) 蒲原聡・湯口真実・栗田貴代・鈴木輝明 (2022) 三河湾豊川河口域におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* の発生から見た流域下水道の栄養塩供給効果. 水環境学会誌, 45(4), 181-191.
- 49) Riemann, B., J. Carstensen, K. Dahl, H. Fossing, J. W. Hansen, H. H. Jakobsen, A. B. Josefson, D. Krause-Jensen, S. Markager, P. A. Staehr, K. Timmermann, J. Windolf, J. H. Andesen, 2016. Recovery of Danish coastal ecosystems after reductions in nutrient loading: A holistic ecosystem approach. *Estuaries and Coasts*, 39, 82-97.