

三河湾における窒素・リン濃度および相互比の長期的変化とアサリ, ノリ漁業との関係

柘植朝太郎・二ノ方圭介・河住大雅・大澤 博・石田俊朗

(2023年12月27日受付, 2024年1月31日受理)

Long-term changes in nitrogen and phosphorus concentrations and these ratio in Mikawa Bay and their relationships with Asari (short necked) clam and Nori production

TSUGE Asataro*, NINOKATA Keisuke*, KAWASUMI Taiga*, OSAWA Hiroshi*, and ISHIDA Toshiro*

Abstract: Long-term changes in nutrients (TN, TP, DIN, and DIP) were examined in Mikawa Bay since the 2000s. The concentrations of TN and TP in Atsumi Bay (eastern Mikawa Bay) and TN, TP, DIN and DIP in Chita Bay (western Mikawa Bay) decreased significantly. But trends in TP and TN/TP ratios changed after November 2017, when the discharge of increased nutrients from the purification center began. Both DIN/DIP and TN/TP ratios in both bays exceeded the Redfield ratio in many periods, suggesting that Mikawa Bay has a strong tendency to be phosphorus limited. The concentrations of DIN and DIP tended to be higher in Chita Bay than in Atsumi Bay, and decreased larger also in Chita Bay, and the DIN/TN ratio and DIP/TP ratio decreased more significantly in Chita Bay continuously. The relationship between TN and TP changed every decade, and the ratio of TP to TN was smaller in the 2010s than in the 2000s. Comparison with previous findings suggests that TP concentrations of 40.7-45.8 $\mu\text{g/L}$ on average per year are required for the growth of Asari (Manila) clams. In recent years, the number of years in Chita Bay where nutrient concentrations did not reach the levels required to produce good-quality nori has been increasing. The current fishery environment is not at the level of nutrient concentrations necessary for the production of clams and nori, and effective and sustainable nutrient management measures are needed.

キーワード: 栄養塩, 三河湾, 長期変動, 貧栄養化, アサリ, ノリ

伊勢, 三河湾では, 水質汚濁防止法に基づき陸域からの流入負荷の総量削減が行われている。その結果, 海域の栄養塩類の減少が報告されており,¹⁻⁶⁾ 栄養塩類の不足によるノリの色落ち⁵⁾ や, アサリの餌不足による肥満度の低下⁷⁾ やへい死等,^{6, 8-10)} 水産資源への悪影響が指摘されている。¹¹⁾ このため, 三河湾においては, 愛知県漁業協同組合連合会からの要望に対応した貧栄養化対策として, 2017年から広域流域下水道における2か所の水質浄化センター(豊川浄化センター及び矢作川浄化センター)からのリン増加放流(当時の愛知県の全リン(TP)濃度上限1mg/L)が実施された。秋冬期を対象にしたことから, 増加放流期間は2017年度には11月から3月, 2018, 2019年度には10月から3月, 2020年度, 2021年

度には9月から3月, 2022年度には9月, 10月であった(愛知県, <https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/466700.pdf>, 2024年1月12日)。2022年11月から3月にかけては, リンの濃度上限を更に高め(国のTP濃度上限2mg/L), 窒素についても増加放流(国の全窒素(TN)濃度上限20mg/L)を行う, 水質の保全と「豊かな海」の両立に向けた社会実験(以下, 社会実験とする。)が実施されている(愛知県, <https://www.pref.aichi.jp/press-release/shaikaijikenkekka.html>, 2023年11月17日)。

蒲原ら⁶⁾は, 三河湾西部の知多湾を対象としたTN及びTPの経年変化から, アサリの餌料濃度にはTPの関与が大きく両者ともに減少傾向がみられることや, 植物プランクトン量と水温を説明変数とするアサリの個体成長

* 愛知県水産試験場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi443-0021, Japan)

材料及び方法

調査海域

調査対象とした三河湾の調査点位置を Fig. 1 に示す。三河湾は渥美湾と知多湾に大別され、¹⁵⁾ 渥美湾では豊川が流入するが比較的水塊が停滞し易く、知多湾では矢作川が流入しエスチュアリー循環に起因する物質循環が大きいといった特徴があり、東西の両湾で環境特性が異なる。¹⁶⁾ そのため、本研究では渥美湾 (8 地点) と知多湾 (4 地点) に区分し解析を行った (図中の括弧内には愛知県公共用水域水質調査¹⁷⁾ の調査点名を併記した)。

TN, TP のデータについては 2000~2022 年度の愛知県公共用水域水質調査結果¹⁷⁾ を用いた。また, DIN, DIP については愛知県公共用水域水質調査と同時に採取した表層水をガラス繊維ろ紙 (グローバルサイエンステクノロジー ジャパン株式会社製, GF/C) でろ過し, ろ液についてオートアナライザー (ブランルーベ社製, AACSI III 及びビーエルテック株式会社製, QuAAtro2-HR) を用いて測定した。なお, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N の合計を DIN, PO₄-P を DIP とした。

解析の対象期間は DIN, DIP のデータが周年存在する 2000 年以降とした。また, 年代別, 地点別の TN と TP, DIN と TN, DIP と TP の関係は, 対象となる調査点の期間内データのうち TN で 3,000 μ g/L, TP で 400 μ g/L 以上の場合は, N/P 比が通常とは異なることが多いため異常高値として除外した。なお, 異常高値は全データ数 ($n=3,348$) の 0.1% ($n=4$) であった。

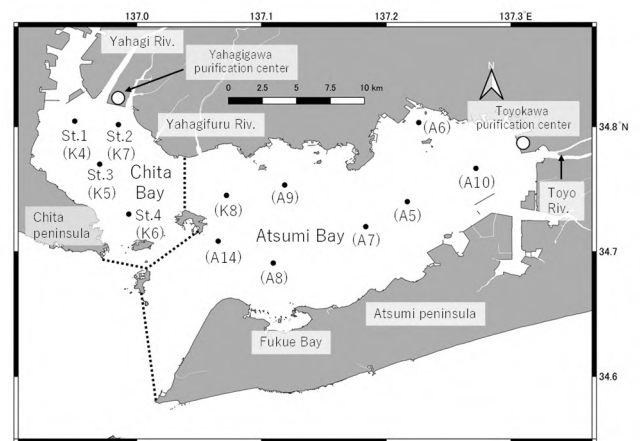


Fig. 1 The location of study area and sampling stations (●) in Mikawa Bay. The station names in parentheses indicate the site names of the public water monitoring surveys (Japanese name: Koukyou-yousui-iki suishitsu-chousa¹⁷⁾).

モデルから 2007 年頃から餌料濃度の減少に伴う餌不足が個体レベルで生じている可能性を報告しており, 栄養塩の減少に伴うアサリの餌料の減少と個体の生存の関係を示した。一方, Uchida *et al.*¹²⁾ は, アサリ漁場近傍で観測された TN やクロロフィル a 濃度とアサリ漁獲量の関係を解析し, これらの濃度とアサリ漁獲量には正の相関がみられることを明らかにしている。以上の研究は, アサリの生存や漁獲量には, 栄養塩を起点とする餌料環境を介した漁場環境とその条件の整理が重要であることを示唆している。しかしながら, 海域ごとにその律速となる栄養塩類が異なるため, 水産生物の生育に必要な栄養塩類の整理には, 海域ごとの TN/TP 比を詳細に把握する必要がある。

ノリ養殖についても栄養塩類の減少による色落ちが発生しており, 蒲原ら³⁾ は渥美湾, 知多湾の栄養塩類について長期変動を解析し, TN や TP の減少割合よりも溶存無機態窒素 (DIN), 溶存無機態リン (DIP) の減少割合の方が大きいことを指摘している。このことから, DIN/TN 比, DIP/TP 比も変化してきている可能性が考えられる。ノリに必要な栄養塩は DIN, DIP であり, アサリをはじめ様々な水産生物に必要な栄養塩類濃度との相互関係を解析するには, DIN, DIP と TN, TP の相互比に関する詳細な解析が必要である。

三河湾における栄養塩類の長期変動については, 1979 年度以降海中の TN, TP, DIN, DIP の減少が続いている等報告があるが,^{1-3, 5, 6)} 水質浄化センターからの栄養塩増加放流開始後の報告はない。水質浄化センターからの栄養塩増加放流によって栄養塩類が海域に放流される濃度が増えることから, その効果を把握するためには, 海域での窒素及びリンの濃度変化や N/P 比について動向解析する必要がある。また, 水質総量削減計画における負荷実績に対する削減割合が窒素とリンで異なる¹³⁾ ことや, アサリやノリが比較的好漁であった 2000 年代と, 不漁^{5, 7, 14)} となってからを含む 2010 年代以降では DIN, DIP と TN, TP の相互比が変化している可能性があるが, 年代別に解析を行った例はない。

本研究では, 栄養塩類の測定データが揃っている 2000 年度以降を対象として海域の TN, TP, DIN, DIP の長期変動や栄養塩増加放流開始後におけるそれぞれの関係を詳細に解析し, 先行知見で示されている栄養塩類の水準を本研究で得られた関係性にフィードバックすることで, 三河湾でアサリやノリの生産に必要な栄養塩類の水準について検討した。

窒素及びリンの長期変動

長期変動は、それぞれの湾に含まれる測点の表層の TN, DIN, TP および DIP 濃度を月毎に平均した。また、この平均値から TN/TP 比, DIN/DIP 比, DIN/TN 比, DIP/TP 比を求めた。さらに、栄養塩濃度管理運転であるリン増加放流及び社会実験の影響を見るため、2017 年 11 月以降を抽出して、同様の項目を比較した。

長期変動についてはノンパラメトリック検定の一つであり、水質データの傾向変動解析で用いられる^{18, 19)} Mann-Kendall 検定²⁰⁾を適用し、傾向の有意性を統計的に検討した。

窒素及びリンの月別長期変化

月別長期変化は、それぞれの湾に含まれる測点の表層の TN, DIN, TP および DIP の濃度を月毎に平均してヒートマップを作成した。また、長期変化を明確にするために、年平均値、2000～2009 年および 2010～2022 年の年平均値を算出した。

年代別の比較

(1) TN と TP の関係

各湾について、3 つの年代別 (2000 年代, 2010 年代, 2020 年代) に TN と TP の散布図を作成した。また、単回帰分析を行い、最小二乗法により回帰式を作成し、回帰式の傾きの差の検定を行った。

(2) ノリ養殖期の年代別 TN と DIN, TP と DIP の関係

ノリに必要な栄養塩は DIN, DIP であり、栄養塩類濃度の相互関係を明らかにするため、DIN, DIP と TN, TP の相互比について解析した。アサリ漁業は両湾共に沿岸部で広く営まれているのに対し、ノリ養殖業は知多湾では St.2～4 の周辺で広く行われているが、渥美湾においては知多湾との境界に近い矢作古川河口域と福江湾周辺 (湾内が中心) のみとなっており近傍の調査点がない。このため、知多湾を対象に調査点ごとの解析を行った。知多湾の調査点 (St.1～4) ごとに TN と DIN, TP と DIP の月別値からノリ養殖が行われる時期に限定 (10-3 月) して、3 つの年代別 (2000 年代, 2010 年代, 2020 年代) で散布図を作成した。また、TN と TP の関係と同様に単回帰分析を行い、最小二乗法により回帰式を作成し、年代別回帰式について傾きの差の検定を行った。

調査点のうち St.1, St.2 は湾奥部で矢作川からの淡水流入の影響が強く、St.4 は湾口に近く外海水の影響を受けやすい等、漁場特性が異なる。¹⁶⁾ ノリ養殖の方法は St.1, St.2 の近傍では支柱柵で、St.3, St.4 の近傍は浮流しを主体としている。良好なノリの生長と品質を保つための最低基準と考えられる栄養塩濃度は流速によって異なり、水産用水基準²¹⁾ においては、DIN は 70～100 $\mu\text{g/L}$ で、

DIP は海水中の N/P 重量比が 7～9 程度で品質が最も良く、7～14 $\mu\text{g/L}$ の濃度であることが望ましいとされている。本県においては DIN 濃度 100 $\mu\text{g/L}$, DIP 濃度 10 $\mu\text{g/L}$ を良質なノリが生産される目安としているが、²²⁾ 知多湾湾口部の浮流し漁場では流れが速いため、この濃度よりもやや低くても良質なノリが生産されることが経験的に知られている。また、伊勢湾 (三重県漁場) においては DIN が 60 $\mu\text{g/L}$ を下回るとノリの色落ちが発生する可能性があるとしており、²³⁾ 知多湾湾口部の浮流し漁場はこれらの中間的な漁場であると考えられるため、湾口部に近い調査点では本県の水準と三重県の水準の中間の濃度を採用したほうがより実態に近いと考えられる。このことから湾奥の St.1, St.2 では DIN で 100 $\mu\text{g/L}$, DIP で 10 $\mu\text{g/L}$, 湾口に近い St.3, St.4 では DIN で 80 $\mu\text{g/L}$, DIP で 8 $\mu\text{g/L}$ を目安として解析した。

結 果

窒素及びリンの長期変動

渥美湾・知多湾における TN, DIN, DIN/TN 比の長期変動を Fig.2 に示した。渥美湾・知多湾ともに TN 及び DIN 濃度は長期的な減少傾向がみられた (Fig.2 上)。DIN/TN 比をみると (Fig.2 下)、渥美湾で横ばい、知多湾で長期的に低下しており、TN 中の DIN の割合が低下していた。渥美湾・知多湾における TP, DIP, DIP/TP 比の長期変動を Fig.3 に示した。リンについても TP 及び DIP 濃度は長期的な減少傾向で (Fig.3 上)、DIP/TP 比は渥美湾で横ばい、知多湾で低下していた (Fig.3 下)。このうち両湾の TN (渥美湾, $\tau=-0.129, p<0.01$, 知多湾, $\tau=-0.178, p<0.01$) と TP (渥美湾, $\tau=-0.157, p<0.01$, 知多湾, $\tau=-0.215, p<0.01$) 濃度の減少、及び知多湾の DIN ($\tau=-0.137, p<0.01$), DIP ($\tau=-0.128, p<0.01$) 濃度の減少と、知多湾の DIN/TN 比 ($\tau=-0.103, p<0.05$) の低下は統計的に有意であった。また、知多湾の DIN 及び DIP 濃度は渥美湾よりも全体的に高く、DIN/TN 比, DIP/TP 比も知多湾の方が高い傾向となっていた。更に、これらの項目に共通して、近年は濃度の振れ幅が小さくなる傾向がみられた。

渥美湾・知多湾における TN/TP 比, DIN/DIP 比の長期変動を Fig.4 に示した。渥美湾・知多湾における TN/TP 比は両湾ともに上昇していた (Fig.4 上)。DIN/DIP 比は渥美湾で横ばい、知多湾で低下していた (Fig.4 下)。このうち知多湾の TN/TP 比 ($\tau=0.123, p<0.01$) は有意に上昇した。

リンの増加放流が行われた 2017 年 11 月以降では (Fig.5, 6, 7), TN 及び DIN は減少し、DIN/TN 比は低下してお

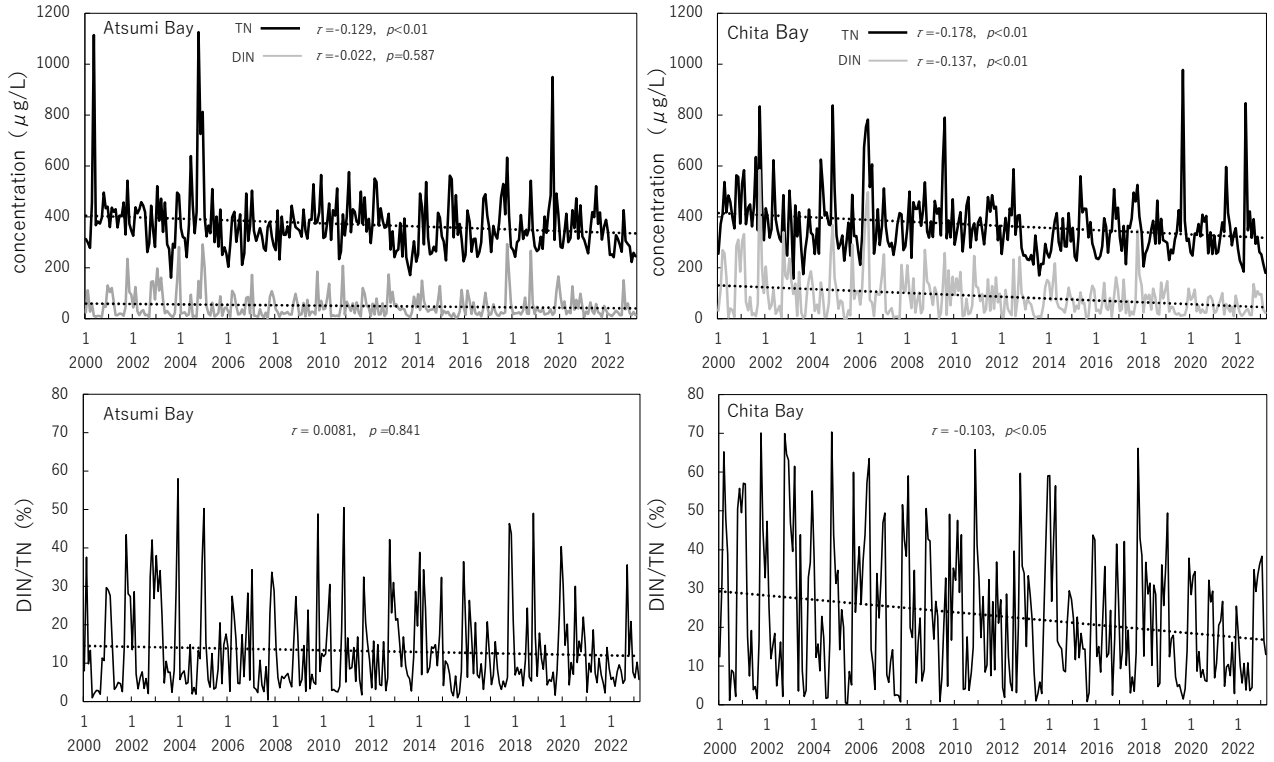


Fig. 2 Long-term changes and trends of TN and DIN concentrations and DIN/TN ratios in Atsumi and Chita Bay. The τ and p -values in the figure show the results of the Mann-Kendall test. The dotted line in the figure indicates the regression line during the study period.

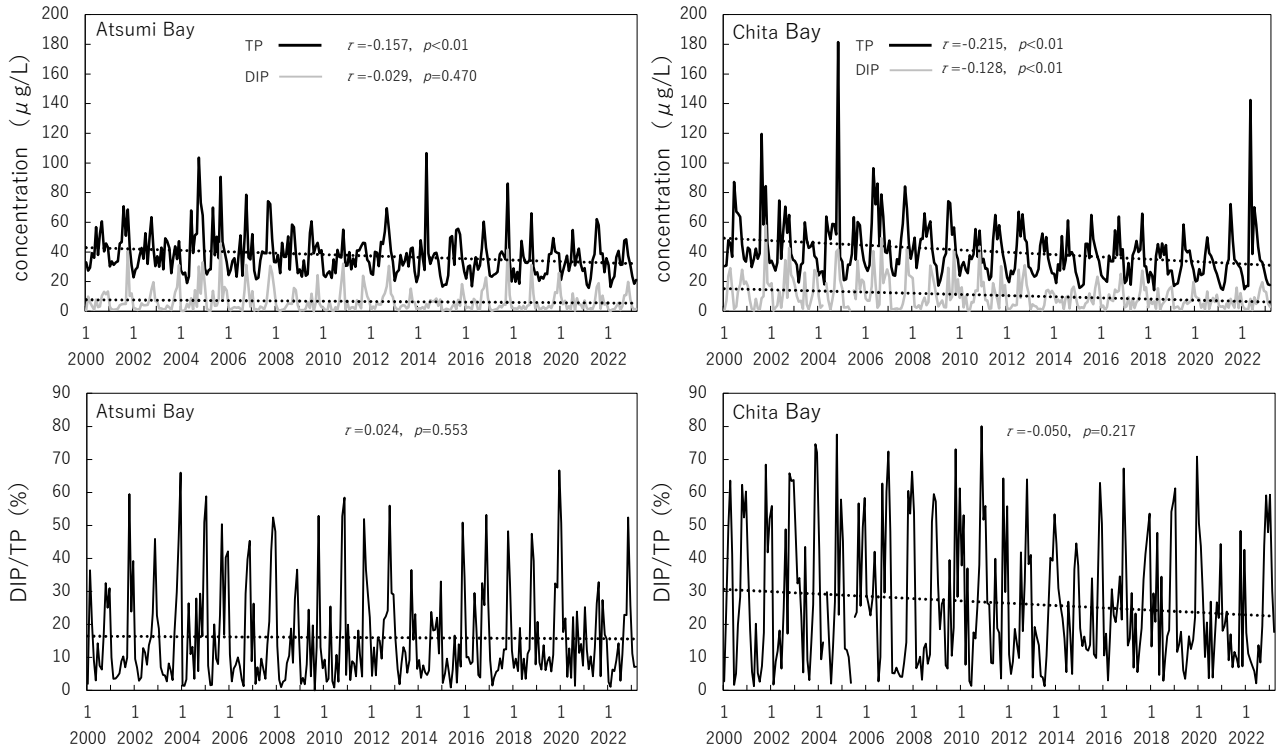


Fig. 3 Long-term changes and trends of TP and DIP concentrations and DIP/TP ratios in Atsumi and Chita Bay. Other supplements in the figure are the same as in Fig. 2.

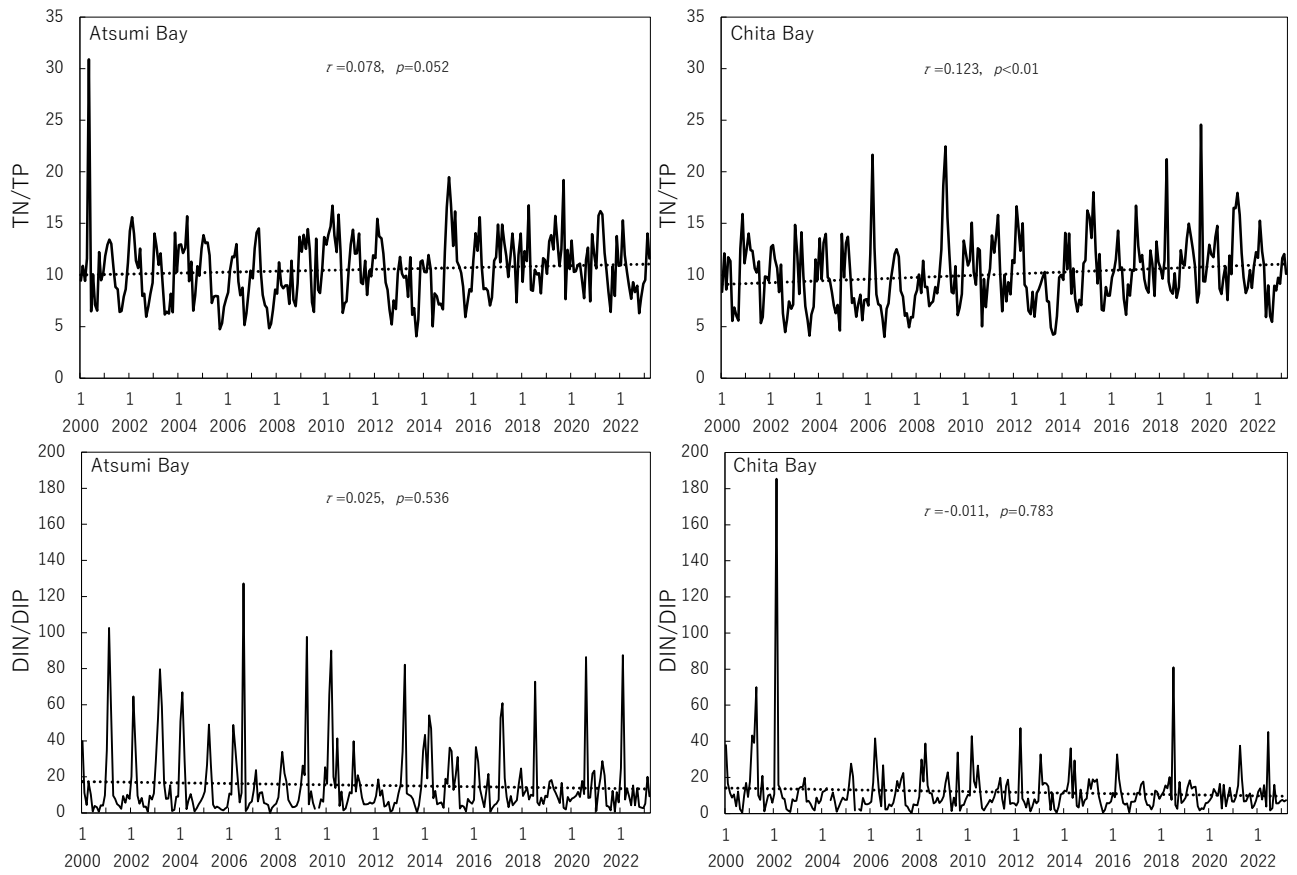


Fig. 4 Long-term changes and trends of TN/TP and DIN/DIP ratios (weight ratio) in Atsumi and Chita Bay. Other supplements in the figure are the same as in Fig. 2.

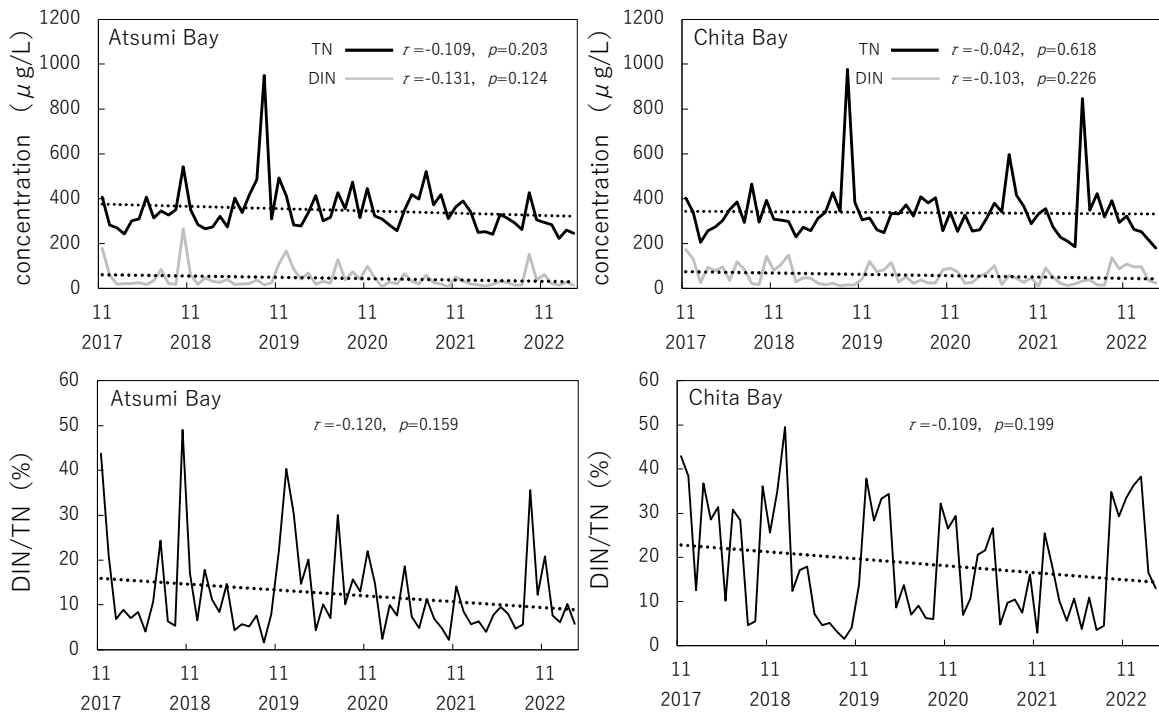


Fig. 5 Long-term changes and trends of TN and DIN concentrations and DIN/TN ratio in Atsumi and Chita Bay since November 2017. Other supplements in the figure are the same as in Fig. 2.

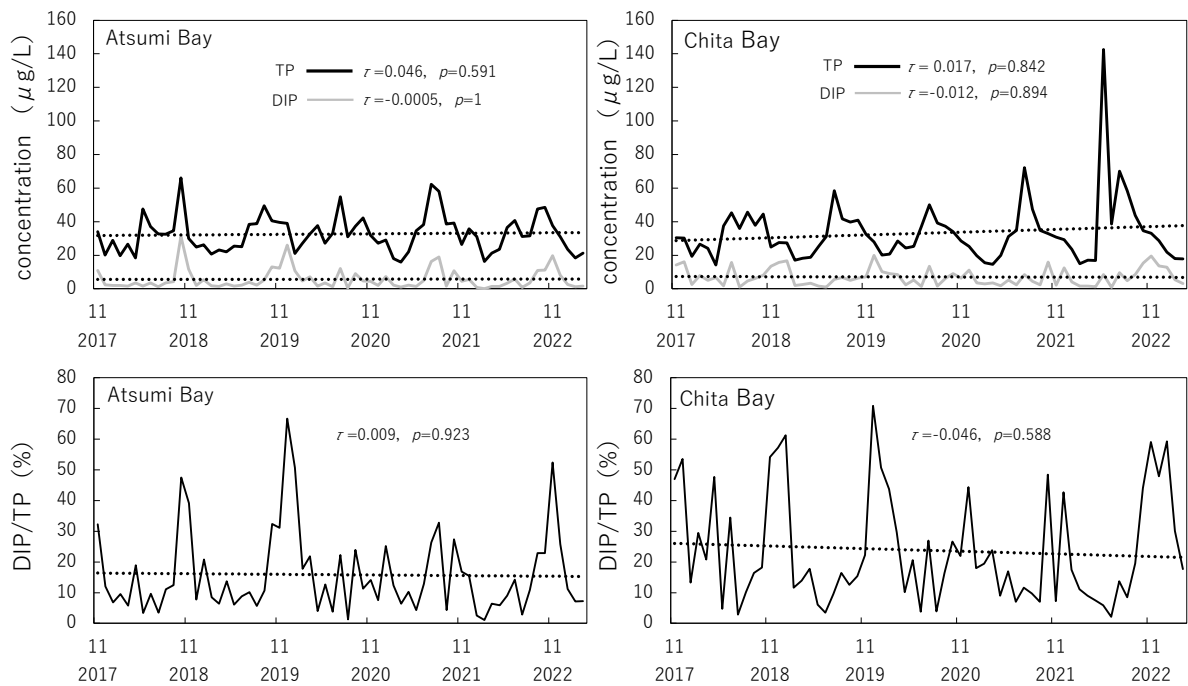


Fig. 6 Long-term changes and trends of TP and DIP concentrations and DIP/TP ratio in Atsumi and Chita Bay since November 2017. Other supplements in the figure are the same as in Fig. 2.

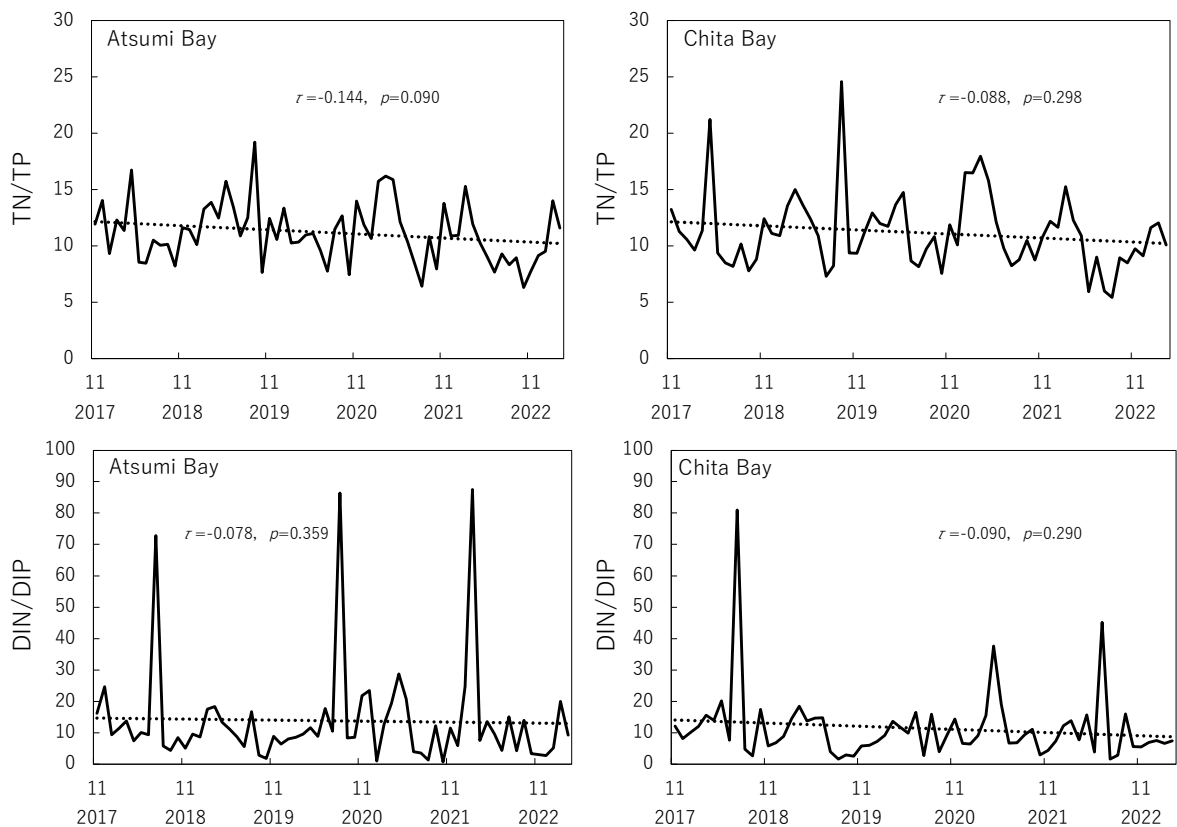


Fig. 7 Long-term changes and trends of TN/TP and DIN/DIP ratios (weight ratio) in Atsumi and Chita Bay since November 2017. Other supplements in the figure are the same as in Fig. 2.

り (Fig.5), DIP については両湾ともに横ばい, DIP/TP 比については渥美湾で横ばい, 知多湾で横ばいに近い低下傾向が続いているが, 両湾の TP が増加傾向に転じていた (Fig.6)。これに伴い TN/TP 比と渥美湾の DIN/DIP 比は

横ばいに近い低下傾向に転じていたが, 知多湾の DIN/DIP 比は引き続き低下傾向だった (Fig.7)。

窒素及びリンの月別長期変化

渥美湾・知多湾における TN, DIN 濃度の月別長期変化

Table 1 Monthly averages of TN and DIN concentrations and these long-term changes in Atsumi Bay and Chita Bay. The higher the concentration, the darker the background color is shown.

Atsumi Bay													Chita Bay																
TN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average	($\mu\text{g/L}$)	TN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average	($\mu\text{g/L}$)
2000	314	299	278	455	1114	367	382	374	397	496	434	441	446	<300	2000	256	372	412	536	418	485	460	397	359	563	557	373	432	<300
2001	360	437	420	430	359	405	403	456	331	542	372	346	405	350	2001	530	584	371	437	449	363	442	635	347	434	452	308	479	350
2002	325	438	413	429	457	445	419	262	295	444	349	282	380	400	2002	433	397	318	352	623	391	348	316	302	485	261	248	373	400
2003	521	385	471	341	457	292	274	162	294	280	496	487	372	450	2003	503	374	158	445	324	419	271	176	269	324	428	338	336	450
2004	357	321	316	241	369	639	445	336	419	1125	725	813	509	500	2004	329	254	355	255	625	523	405	418	370	368	838	510	437	500
2005	400	324	366	336	509	300	401	284	425	250	280	256	345	550	2005	328	275	295	328	228	300	378	248	488	325	325	263	315	550
2006	204	289	399	420	302	353	411	212	256	492	305	365	334	600<	2006	212	327	675	755	783	517	606	255	314	431	290	364	461	600<
2007	503	346	306	330	355	326	277	267	360	382	323	287	338	2000-2009 average	2007	512	362	305	284	298	251	299	370	415	410	270	284	338	2000-2009 average
2008	270	426	233	401	330	330	364	320	444	396	360	354	352	388	2008	355	499	240	457	431	431	460	365	422	535	342	318	405	388
2009	347	322	429	346	314	388	389	528	374	380	417	564	400	2010-2022 average	2009	382	321	463	413	434	327	612	790	315	387	319	469	436	2010-2022 average
2010	316	322	378	452	310	426	405	513	233	264	410	327	363	359	2010	291	335	379	419	264	342	444	478	279	352	378	308	355	359
2011	401	576	339	430	420	382	375	499	372	477	343	393	417	2010-2022 average	2011	377	397	349	292	369	478	420	486	432	440	305	365	393	2010-2022 average
2012	297	379	552	537	367	434	388	357	362	413	272	343	392	343	2012	254	326	396	310	432	406	588	330	405	408	278	248	365	343
2013	242	266	272	376	244	394	241	205	171	245	305	224	265	2000-2009 average	2013	249	233	230	250	213	328	258	170	215	215	295	258	243	2000-2009 average
2014	253	491	439	293	538	320	254	259	283	264	416	398	350	2010-2022 average	2014	240	268	335	385	415	300	268	395	285	283	415	303	324	2010-2022 average
2015	324	304	229	391	562	300	320	485	329	373	311	225	367	2000-2009 average	2015	358	245	228	325	560	418	432	431	320	380	296	271	355	2000-2009 average
2016	251	425	380	263	313	315	243	261	299	473	490	405	343	2010-2022 average	2016	238	233	247	285	395	362	259	337	344	509	393	437	337	2010-2022 average
2017	359	262	365	330	314	376	478	530	410	633	406	282	395	2000-2009 average	2017	318	267	365	214	365	356	393	495	460	526	403	340	375	2000-2009 average
2018	270	243	301	310	407	313	345	327	351	543	351	285	337	2010-2022 average	2018	206	257	275	302	351	385	294	464	297	393	309	304	320	2010-2022 average
2019	265	273	322	274	402	338	418	484	949	310	492	412	412	2000-2009 average	2019	298	230	272	257	312	340	427	344	977	384	305	314	372	2000-2009 average
2020	282	278	338	413	301	318	425	356	473	315	445	323	356	2010-2022 average	2020	261	248	335	332	372	323	408	362	404	257	339	254	326	2010-2022 average
2021	309	283	257	349	418	399	521	373	418	311	363	389	366	2000-2009 average	2021	327	256	261	315	379	341	596	416	366	288	333	356	353	2000-2009 average
2022	341	250	253	242	329	313	291	263	426	306	294	284	299	2010-2022 average	2022	274	228	209	185	846	348	422	319	391	294	322	262	342	2010-2022 average
2023	223	260	246	2023	253	217	180																						

Table 2 Monthly averages of TP and DIP concentrations and these long-term changes in Atsumi Bay and Chita Bay. The higher the concentration, the darker the background color is shown.

Atsumi Bay													Chita Bay																	
TP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average	($\mu\text{g/L}$)	TP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average	($\mu\text{g/L}$)	
2000	331	275	295	392	361	568	381	525	605	405	457	432	419	<30	2000	305	308	48.1	45.8	36.9	87.3	67.1	66.1	63.7	45.0	35.1	33.5	49.1	<30	
2001	303	338	313	330	337	458	467	70.9	51.3	68.6	43.3	30.9	43.3	35	2001	43.0	41.7	29.9	35.5	42.3	35.4	39.0	119.5	85.5	84.5	46.1	32.7	50.7	35	
2002	228	281	296	377	422	35.4	52.7	32.0	49.7	63.5	42.7	30.5	39.0	40	2002	34.1	30.8	27.6	32.9	74.7	35.5	55.3	70.6	52.9	65.1	38.8	48.8	46.1	40	
2003	372	300	42.9	28.2	49.2	47.4	42.5	25.8	35.9	43.9	35.1	47.2	38.8	45	2003	33.9	31.4	19.4	31.4	32.8	60.1	48.1	42.8	43.7	46.8	37.3	35.5	38.5	45	
2004	277	248	261	191	235	68.0	39.1	51.5	52.4	103.6	73.1	64.8	47.8	50<	2004	24.3	26.5	27.0	18.3	64.0	54.5	48.5	59.0	60.8	51.8	181.5	36.5	54.2	50<	
2005	289	248	279	283	69.9	37.5	50.4	35.8	90.8	48.9	40.6	33.3	42.9	2000-2009 average	2005	33.5	21.0	21.5	31.5	31.3	38.3	63.5	34.2	60.3	58.0	43.0	34.3	39.3	2000-2009 average	
2006	245	276	338	357	322	37.7	51.1	24.1	49.8	78.6	36.3	35.0	38.1	41.2	2006	30.2	27.1	31.2	59.6	96.6	72.1	86.2	44.1	78.8	64.0	39.9	39.2	55.8	41.2	
2007	52.0	27.4	21.7	22.7	34.4	40.5	39.2	39.1	74.3	72.4	48.9	33.3	42.1	2010-2022 average	2007	47.6	30.1	24.4	24.1	35.2	31.8	49.5	59.0	84.2	69.2	45.7	35.5	44.7	2010-2022 average	
2008	33.0	37.5	25.9	46.1	36.7	36.7	50.6	28.1	58.6	56.8	39.2	25.8	39.6	35.0	2008	41.6	49.7	29.1	40.2	48.7	48.7	66.1	50.4	56.7	60.5	41.6	32.8	47.2	35.0	
2009	28.3	23.2	34.3	23.9	25.2	62.8	60.6	39.1	43.7	46.1	39.2	41.3	38.1	2000-2009 average	2009	30.7	17.2	20.6	26.5	36.1	39.1	74.4	72.9	51.6	56.6	39.2	35.2	41.1	2000-2009 average	
2010	24.5	23.1	25.7	27.0	22.4	34.9	25.6	41.5	36.8	36.4	55.1	30.6	32.0	2010-2022 average	2010	23.9	30.6	33.2	27.8	25.6	37.8	35.3	38.5	55.5	36.5	54.4	32.5	36.0	2010-2022 average	
2011	30.9	40.0	28.2	35.6	30.0	41.1	41.1	43.9	46.3	45.9	34.8	33.0	37.5	2000-2009 average	2011	35.5	28.7	28.7	21.2	23.4	48.0	65.0	48.5	68.0	60.3	48.0	31.9	39.5	2000-2009 average	
2012	25.5	24.6	40.2	39.6	30.4	46.9	45.4	53.7	69.5	54.8	40.6	33.7	42.1	2010-2022 average	2012	22.8	19.6	27.3	25.1	28.8	44.8	67.0	50.5	65.4	48.7	46.6	30.0	39.7	2010-2022 average	
2013	20.6	26.2	27.9	38.0	31.0	33.6	39.3	30.3	42.3	43.0	27.0	19.6	31.6	2000-2009 average	2013	28.9	25.5	23.4	24.3	28.5	44.3	52.5	40.0	60.0	60.0	35.8	30.3	25.8	34.1	2000-2009 average
2014	24.5	47.9	36.8	27.5	106.8	39.0	32.0	36.3	39.1	39.5	34.0	24.0	40.6	2010-2022 average	2014	25.3	19.0	31.8	27.5	50.8	34.8	61.3	37.5	40.0	37.3	26.5	35.0	2010-2022 average		
2015	16.6	18.0	17.9	24.2	49.6	50.7	31.4	54.8	55.7	51.7	36.1	26.8	36.1	2000-2009 average	2015	22.0	15.8	16.8	18.1	45.6	45.5	35.9	33.5	48.3	47.0	37.0	33.8	35.6	2000-2009 average	
2016	21.9	30.3	30.8	16.9	28.7	36.6	28.0	30.8	42.4	60.5	43.0	34.6	33.7	2010-2022 average	2016	24.4	22.6	21.5	19.9	37.6	33.8	33.7	54.8	37.8	63.8	37.5	41.9	35.8	2010-2022 average	
2017	24.1	23.4	24.5	25.3	26.6	38.4	40.4	37.8	35.0	86.1	34.0	20.1	34.7	2000-2009 average	2017	19.0	20.8	32.5	17.9	37.9	41.0	47.5	40.0	41.6	39.8	40.9	30.2	35.4	2000-2009 average	
2018	28.9	19.8	26.5	18.5	47.5	37.0	32.8	32.5	34.6	66.0	30.2	24.9	33.3	2010-2022 average	2018	19.4	26.7	24.2	14.3	37.4	45.3	35.9	45.7	38.0	44.6	24.9	27.4	32.0	2010-2022 average	
2019	26																													

Table 3 Monthly averages of TN/TP and DIN/DIP ratios (weight ratio) and these long-term changes in Atsumi and Chita Bay.

The higher the ratio, the darker the background color is shown.

Atsumi Bay

TN/TP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average
2000	9.5	10.9	9.4	11.6	30.9	6.5	10.0	7.1	6.6	12.2	9.5	10.2	11.2
2001	11.9	12.9	13.4	13.0	10.6	8.9	8.6	6.4	6.5	7.9	8.6	11.2	10.0
2002	14.3	15.6	14.0	11.4	10.7	12.6	8.0	8.2	5.9	7.0	8.2	9.3	10.4
2003	14.0	12.8	11.0	12.1	9.3	6.2	6.5	6.3	8.2	6.4	14.1	10.3	9.8
2004	12.9	13.0	12.1	12.6	15.7	9.4	11.3	6.5	8.0	10.9	9.9	12.5	11.2
2005	13.9	13.1	13.1	11.9	7.3	7.9	8.0	7.9	4.7	5.3	6.9	7.7	9.0
2006	8.3	10.5	11.8	11.7	13.0	9.4	8.0	8.8	5.1	6.3	8.4	10.4	9.3
2007	9.7	12.6	14.1	14.5	10.3	8.0	7.1	6.8	4.9	5.3	6.6	8.6	9.0
2008	8.2	11.2	9.0	8.7	9.0	9.0	7.2	11.4	7.6	7.0	9.2	13.7	9.3
2009	12.3	13.9	12.5	14.5	12.5	7.4	6.4	13.5	8.5	8.2	10.6	13.7	11.2
2010	12.9	13.9	14.7	16.7	13.8	12.2	15.8	12.3	6.3	7.3	7.4	10.7	12.0
2011	13.0	14.4	12.1	12.1	14.0	9.3	9.1	11.4	8.1	10.4	9.9	11.9	11.3
2012	11.6	15.4	13.7	13.6	12.1	9.3	8.5	6.7	5.2	7.5	6.7	10.2	10.0
2013	11.8	10.1	9.7	9.9	7.9	7.1	6.1	6.8	4.1	5.7	11.3	11.4	8.9
2014	10.3	10.3	11.9	10.5	5.0	8.2	7.9	7.1	7.2	6.7	12.2	16.6	9.5
2015	19.5	16.9	12.8	16.1	11.3	10.8	10.2	8.9	5.9	7.2	8.6	8.4	11.4
2016	11.4	14.0	12.3	15.6	10.9	8.6	8.7	8.5	7.1	7.8	11.4	11.7	10.7
2017	14.9	11.2	14.9	13.1	11.8	9.8	11.8	14.0	11.7	7.3	11.9	14.0	12.2
2018	9.3	12.3	11.3	16.7	8.6	8.5	10.5	10.1	10.2	8.2	11.6	11.4	10.7
2019	10.1	13.3	13.9	12.5	15.7	13.5	10.9	12.5	19.2	7.7	12.4	10.6	12.7
2020	13.3	10.3	10.3	11.0	11.1	9.6	7.8	11.5	12.7	7.4	14.0	11.9	10.9
2021	10.7	15.8	16.2	15.9	12.1	10.4	8.4	6.7	10.8	8.0	13.8	10.9	11.6
2022	10.9	15.3	11.9	10.3	9.0	7.7	9.3	8.3	8.9	6.3	7.8	9.2	9.6
2023	9.5	14.0	11.6										

DIN/DIP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average
2000	39.7	11.2	4.5	16.9	10.3	0.9	3.8	3.2	0.7	4.3	4.0	9.8	9.1
2001	34.6	102.6	58.9	9.7	7.9	5.0	3.9	2.3	9.3	5.8	10.1	7.8	21.5
2002	20.2	64.5	34.7	9.7	5.2	8.4	3.5	3.6	0.8	9.7	7.5	10.9	14.9
2003	28.4	52.7	79.7	58.9	16.3	7.9	8.0	15.5	1.1	1.7	9.1	9.1	24.0
2004	50.8	66.9	28.9	2.2	7.0	10.6	6.3	0.9	2.6	4.9	6.8	8.9	16.4
2005	11.8	26.7	49.0	27.0	4.5	2.7	3.5	2.9	1.9	1.5	2.5	3.2	11.4
2006	10.8	10.1	48.7	34.4	20.9	5.9	11.2	127.3	1.1	2.6	5.2	6.5	23.7
2007	12.6	23.7	6.4	11.1	11.6	5.6	5.1	4.5	0.1	2.9	4.2	5.1	7.7
2008	8.6	21.4	34.0	22.0	17.4	7.3	5.0	3.2	3.4	4.1	6.9	14.8	12.3
2009	26.2	21.0	97.6	4.8	12.1	5.6	2.3	1.1	2.9	7.6	6.3	25.3	19.3
2010	16.2	65.6	89.9	20.0	13.8	4.4	3.8	12.0	1.3	2.5	6.4	11.6	23.7
2011	10.8	39.7	12.0	21.0	16.9	8.6	4.8	5.0	5.8	5.1	5.9	11.7	11.7
2012	9.4	18.7	9.5	12.7	3.5	4.0	6.2	0.8	1.3	5.7	5.2	10.8	7.3
2013	15.9	34.1	82.3	10.9	10.0	9.4	7.8	4.4	0.3	4.3	14.0	34.5	19.0
2014	43.3	19.1	54.1	46.9	8.1	12.2	4.8	5.4	5.8	2.8	19.0	16.2	19.8
2015	36.2	34.3	12.9	21.0	31.1	2.5	4.1	3.5	0.9	7.8	6.2	5.2	13.8
2016	7.2	36.6	28.4	13.0	7.8	3.2	11.5	21.7	0.7	2.7	4.4	5.2	11.9
2017	7.2	52.7	60.9	19.3	8.9	3.2	9.4	4.3	5.8	7.1	16.2	24.7	18.3
2018	9.3	11.5	13.8	7.4	10.1	9.4	72.8	5.8	4.3	8.5	5.0	9.5	14.0
2019	8.7	17.5	18.3	13.4	11.2	8.8	5.6	16.7	2.9	1.9	8.9	6.4	10.0
2020	8.0	8.5	9.5	11.6	8.9	17.7	10.5	86.4	8.3	8.5	21.8	23.4	18.6
2021	1.0	12.7	19.4	28.8	20.8	3.9	3.6	1.4	12.2	0.6	11.5	5.9	10.2
2022	24.8	87.5	7.5	13.6	9.5	4.3	15.1	4.3	13.9	3.4	3.1	2.7	15.8
2023	5.2	20.0	9.2										

Chita Bay

TN/TP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average
2000	8.4	12.1	8.6	11.7	11.3	5.6	6.9	6.0	5.6	12.5	15.9	11.1	9.6
2001	12.3	14.0	12.4	12.3	10.6	10.2	11.3	5.3	5.9	9.9	9.8	9.4	10.3
2002	12.7	12.9	11.5	10.7	8.3	11.0	6.3	4.5	5.7	7.5	6.7	7.1	8.7
2003	14.8	11.9	8.1	14.2	9.9	7.0	5.6	4.1	6.2	6.0	11.5	9.5	9.1
2004	13.6	9.6	13.1	14.0	9.8	9.6	8.4	7.1	6.3	7.1	4.6	14.0	9.7
2005	9.8	13.1	13.7	10.4	7.3	7.7	5.9	7.1	8.1	5.6	7.6	7.7	8.7
2006	7.0	12.0	21.6	12.7	8.1	7.2	7.0	5.8	4.0	6.7	7.3	9.3	9.1
2007	10.7	12.0	12.5	11.8	8.5	7.9	6.0	6.3	4.9	5.9	5.9	8.0	8.4
2008	8.5	10.1	8.2	11.4	8.8	8.8	7.0	7.2	7.5	8.8	8.2	9.7	8.7
2009	12.5	18.7	22.4	15.6	12.0	8.4	8.2	10.8	6.1	6.8	8.1	13.3	11.9
2010	12.2	10.9	11.4	15.1	10.3	9.1	12.6	12.4	5.0	9.6	6.9	9.5	10.4
2011	10.6	13.8	12.2	13.8	15.8	9.9	6.5	10.0	7.5	9.3	8.1	11.5	10.7
2012	11.2	16.6	14.5	12.3	15.0	9.1	8.8	6.5	6.2	8.4	6.0	8.3	10.2
2013	8.6	9.1	9.8	10.3	7.5	7.4	4.9	4.2	4.3	6.0	9.0	10.0	7.7
2014	9.5	14.1	10.6	14.0	8.2	10.6	7.7	6.4	7.6	7.1	11.1	11.4	9.9
2015	16.3	15.6	13.6	18.0	12.3	9.2	12.0	6.6	6.5	8.8	8.0	8.0	11.2
2016	9.8	10.3	11.5	14.3	10.5	10.7	7.7	6.1	9.1	8.0	10.5	10.4	9.9
2017	16.7	12.9	11.2	11.9	9.6	8.7	8.3	12.4	11.1	9.1	8.0	13.2	11.3
2018	10.6	9.6	11.4	21.2	9.4	8.5	8.2	10.2	7.8	8.8	12.4	11.1	10.8
2019	10.9	13.5	15.0	13.6	12.4	10.9	7.3	8.3	24.6	9.4	9.4	11.2	12.2
2020	12.9	12.0	11.7	13.7	14.7	8.7	8.2	9.7	10.8	7.6	11.9	10.1	11.0
2021	16.5	16.5	18.0	15.8	12.1	9.8	8.3	8.8	10.5	8.7	10.8	12.2	12.3
2022	11.7	15.3	12.3	10.9	5.9	9.0	6.0	5.4	9.0	8.5	9.7	9.1	9.4
2023	11.6	12.0	10.1										

DIN/DIP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual average
2000	37.9	16.5	11.3	8.9	10.7	4.0	12.2	2.5	0.4	10.1	16.9	9.2	11.7
2001	17.8	43.3	39.2	69.9	10.1	7.6	20.9	1.1	5.6	10.1	10.6	6.0	20.2
2002	10.8	185.5	15.7	13.6	8.4	8.2	2.4	1.5	0.7	7.9	6.8	7.1	22.4
2003	13.7	14.6	14.7	19.8	6.5	7.0	5.4	2.8	1.6	8.8	5.6	7.3	9.0
2004	12.0	12.5	14.2	7.5	11.7	6.9	1.0	3.8	6.4	8.8	7.6	8.4	8.4
2005	7.5	14.7	27.6	20.6	1.7	2.3	1.6	3.6	5.2	5.1	5.4	9.1	9.1
2006	6.4	17.2	41.7	25.6	12.2	4.0	26.7	2.3	2.2	5.1	4.0	6.0	12.8
2007	11.0	18.0	14.1	19.4	22.5	4.5	3.9	1.8	0.3	5.1	4.7	4.6	9.1
2008	9.3	29.9	17.7	38.8	15.4	11.2	11.0	5.5	6.2	8.8	5.9	7.2	13.9
2009	9.5	17.1	22.8	12.8	1.3	8.8	4.2	3.3	1.5	4.6	4.8	7.7	10.7
2010	10.3	9.8	42.8	17.9	14.3	26.6	12.6	3.0	1.7	3.8	5.7	7.5	13.0
2011	6.2	9.1	13.0	13.8	19.8	8.1	2.6	15.2	18.8	5.3	5.7	5.6	10.3
2012	4.5	6.5	47.4	8.2	6.2	3.4	8.3	1.2	3.8	7.6	5.6	6.8	9.1
2013	32.9	15.9	16.9	16.6	15.0	1.8	11.3	2.4	0.5	3.6	10.5	11.1	11.5
2014	12.7	12.1	17.6	36.2	8.5	29.4	4.1	3.5	13.2	4.2	7.3	8.2	13.1
2015	19.2	13.6	18.8	17.4	18.8	9.5	5.1	0.3	2.1	5.8	5.6	6.7	10.3
2016	11.5	9.0	32.7	19.2	12.2	5.8	4.9	5.6	0.7	6.4	6.5	8.8	10.1
2017	11.5	11.2	16.0	17.7	8.0	4.7	4.5	2.3	4.5	12.7	12.1	8.1	9.4
2018	10.1	12.0	15.6	14.0	20.2	7.6	80.9	4.7	2.7	17.4	5.9	6.8	16.5
2019	8.8	14.5	18.5	13.7	14.6	14.8	4.0	1.6	3.0	2.5	5.8	6.0	9.0
2020	7.2	9.1	13.6	11.7	9.8	16.5	2.8	16.0	4.0	9.1	14.3	6.7	10.1
2021	6.4	9.1	15.5	37.6	19.0	6.7	6.9	9.4	11.1	2.9	4.4		

を Table 1 に示した。TN 濃度の月別変化については (Table 1 上), 両湾ともに 2000 年代前半には明確な季節変動はみられなかったが, 渥美湾では 2013 年頃から冬から春季 (12~4 月) に知多湾では 2010 年頃から秋から春季 (11~4 月) に濃度が低い傾向に変化した。両湾ともに 2013 年は周年にわたり TN 濃度は低かった。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は, 渥美湾で 388 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 401 $\mu\text{g/L}$ だったが, 2010 年以降の平均値は, 渥美湾で 359 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 343 $\mu\text{g/L}$ となっており, 知多湾での TN 減少量が大きかった。DIN 濃度の月別変化については (Table 1 下), 両湾ともに秋から冬季に DIN 濃度が高く, 夏季に低くなる季節変動がみられた。渥美湾については 2015 年頃より 10~12 月を除くと 40 $\mu\text{g/L}$ を下回る月が多くなっており, 知多湾については 2012 年頃から濃度の高い時期である 1~2 月でも 40 $\mu\text{g/L}$ を下回ることが多くなった。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は渥美湾で 55 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 114 $\mu\text{g/L}$ だったが, 2010 年以降の平均値は渥美湾で 47 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 69 $\mu\text{g/L}$ となっており, 知多湾における DIN 減少量が大きかった。

渥美湾・知多湾における TP, DIP 濃度の月別長期変化を Table 2 に示した。TP 濃度の月別変化については (Table 2 上), 両湾ともに夏から秋季に濃度が高く, 冬季は低いという季節変動がみられた。各年の季節変動は同様であるものの, 渥美湾では 2016 年, 知多湾では 2018 年以降 (2022 年を除く), 年平均濃度は 35 $\mu\text{g/L}$ 以下と低かった。また, 冬季は濃度の低い季節であるが, 2017 年以降には 35 $\mu\text{g/L}$ 未満で推移する期間が長くなっている傾向がみられた。渥美湾においては 2015 年以降の 1~4 月, 知多湾では 2012 年以降の 12~4 月には, 大半の月で TP 濃度は 30 $\mu\text{g/L}$ を下回った。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は渥美湾で 41.2 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 46.7 $\mu\text{g/L}$ だったが, 2010 年以降の平均値は渥美湾で 35.0 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 35.5 $\mu\text{g/L}$ となっており, 知多湾での TP 濃度の減少量が大きかった。DIP 濃度の月別変化については (Table 2 下), 渥美湾では 1~8 月, 知多湾では 1~6 月に濃度が低いという季節変動がみられた。渥美湾では 12, 1, 4, 5 月において DIP 濃度は経年的に減少傾向となっており, 知多湾では 1, 4, 9 月において DIP 濃度の減少傾向がみられた。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は渥美湾で 7.5 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 13.5 $\mu\text{g/L}$ だったが, 2010 年以降の平均値は渥美湾で 6.1 $\mu\text{g/L}$, 知多湾で 8.6 $\mu\text{g/L}$ となっており, TN, DIN 及び TP 同様に DIP についても知多湾の減少量が大きかった。渥美湾・知多湾における TN/TP 比, DIN/DIP 比の月別

長期変化を Table 3 に示した。TN/TP 比の月別変化については (Table 3 上), 両湾ともに 6~10 月に TN/TP 比の値が低く, 11~5 月は高いという季節変動がみられた。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は渥美湾で 10.0, 知多湾で 9.4 だったが, 2010 年以降の平均値は渥美湾で 10.9, 知多湾で 10.5 であり, 両期間とも渥美湾で高かった。また平均値は, 両湾ともに 1 程度上昇していた。DIN/DIP 比の月別変化については (Table 3 下), 両湾ともに 6~10 月に DIN/DIP 比の値が低く, 11~5 月は高く, TN/TP 比とほぼ同様の季節変動をしていた。また, 多くの月で Redfield 比^{2,4)} (重量比 7.2) を上回った。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は渥美湾で 16.0, 知多湾で 12.7 だったが, 2010 年以降の平均値は渥美湾で 14.9, 知多湾で 11.2 となっており, 両湾ともに低下していた。

渥美湾・知多湾における DIN/TN 比, DIP/TP 比の月別長期変化を Table 4 に示した。DIN/TN 比の月別変化については (Table 4 上), 夏に DIN/TN 比の値が低く, 秋から春は高いという季節変動をしていた。渥美湾では, 冬季の DIN/TN 比に低下傾向がみられ, 2015 年以降は 1~3 月に 10%を下回る年が多くなった。知多湾では 1 月の DIN/TN 比に低下傾向がみられ, 2010 年以降では 10 月や 11 月にも低い年がみられるようになった。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は渥美湾で 13.5, 知多湾で 26.4 だったが, 2010 年以降の平均値は渥美湾で 13.0, 知多湾で 20.4 となっており, 知多湾の方が大きく低下していた。DIP/TP 比の月別変化については (Table 4 下), 渥美湾では 1~8 月に DIP/TP 比の値が低く, 9~12 月に高い一方で, 知多湾では 5~8 月に低く, 9~4 月は高くなり, 両湾でやや異なる季節変動がみられた。渥美湾では 9~12 月を除けば DIP/TP 比が低く, 大半が 10%未満だった。知多湾では DIN/TN 比と同様に 1 月の DIP/TP 比が低下傾向で, 2016 年以降では 10 月や 11 月でも低い年がみられるようになった。年平均値をみると, 2000 年から 2009 年までの平均値は渥美湾で 16.3, 知多湾で 28.9 だったが, 2010 年以降の平均値は渥美湾で 15.9, 知多湾で 24.4 となっており, 知多湾の方が大きく低下していた。また, 平均値は知多湾のほうが高かった。

年代別の比較

(1) TN と TP の関係

渥美湾と知多湾における年代別の TN と TP の関係をみると (Fig.8), 両湾ともに, 2000 年代よりも 2010 年代の方が回帰直線の傾きが有意に小さくなっており ($p<0.05$), TN に対する TP の割合が低下していた。また, これらの回帰式から TN 濃度に対する各年代の TP 濃度

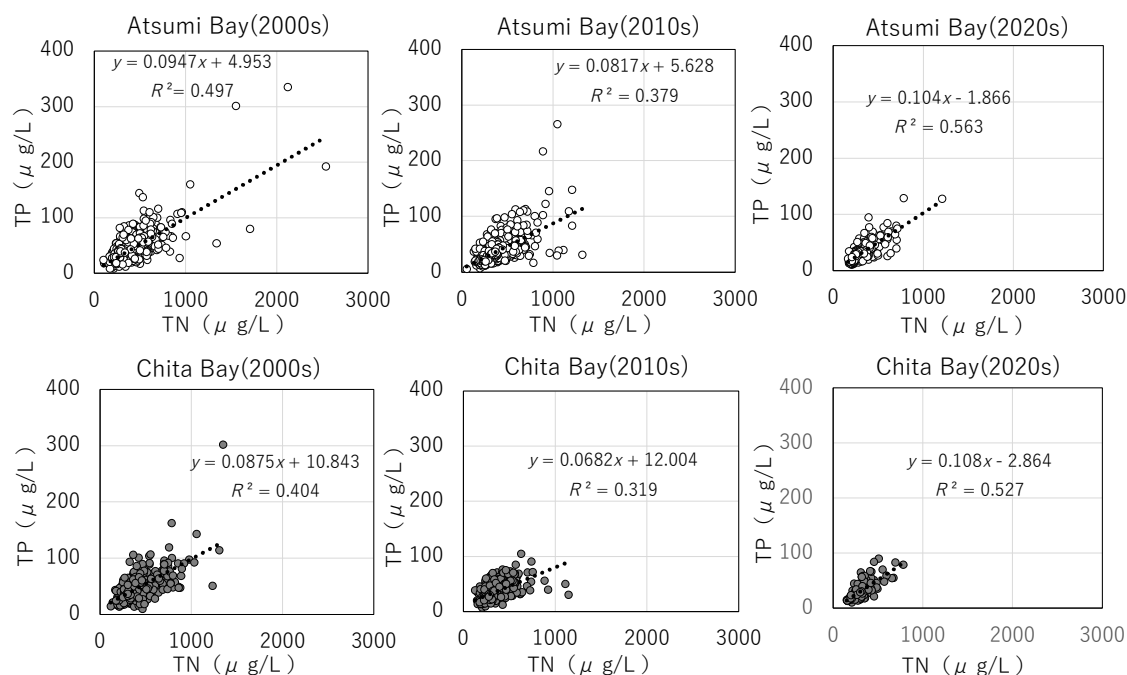


Fig. 8 Relationship between TN and TP at Atsumi and Chita Bay in each decade. The dotted lines in each figure indicate regression equations.

Table 5 TP concentration at each TN concentration level calculated from the relationship equation between TN and TP in each decade.

Atsumi Bay								
TN (μg/L)		250	300	350	400	450	500	550
TP (μg/L)	2000s	28.6	33.4	38.1	42.8	47.6	52.3	57.0
	2010s	26.1	30.1	34.2	38.3	42.4	46.5	50.6
	2020s	24.1	29.3	34.5	39.7	44.9	50.1	55.3

Chita Bay								
TN (μg/L)		250	300	350	400	450	500	550
TP (μg/L)	2000s	32.7	37.1	41.5	45.8	50.2	54.6	59.0
	2010s	29.1	32.5	35.9	39.3	42.7	46.1	49.5
	2020s	24.1	29.5	34.9	40.3	45.7	51.1	56.5

を算出したところ (Table 5), 2010年代における2000年代と同程度のTP濃度は、2000年代に対して渥美湾で50 μg/L前後、知多湾で50~100 μg/L程度高いTN濃度であった。一方、2020年代にはサンプルは少ないものの、2010年代と比べると回帰直線の傾きは有意に大きく ($p < 0.05$), 切片は小さくなり、低濃度のTNではTP濃度が低く、高濃度のTNではTP濃度が高かった (Fig.8, Table 5)。

(2) ノリ漁期の年代別 TN と DIN, TP と DIP の関係

年代別のTN濃度に対するDIN濃度の関係と得られた回帰直線を Fig.9 に示した。回帰直線の傾きは、各地点とも概ね経年的に小さくなっており (2000年代に対する

2020年代の傾きの差は全て有意; $p < 0.05$), TNに対するDINの割合は低くなった。得られた各回帰直線からTN濃度に対するDIN濃度を年代別に算出すると (Table 6), St.1, 2における低濃度のTN (TN350 μg/L未満)を除いて、どの調査点においても経年的にDIN濃度は低くなった。ノリ養殖に必要なDIN濃度 (St.1, St.2=100 μg/L, St.3, St.4=80 μg/L)に対応するTN濃度は、調査点別、年代別に異なるものの、概ね年代を経るごとに上昇した。データ数が多く現在の環境に近い2010年代の回帰式 (St.1, $y = 0.727x - 129.21$, St.2, $y = 0.649x - 93.573$, St.3, $y = 0.438x - 55.407$, St.4, $y = 0.308x - 23.912$) からノリ養殖に必要なDIN濃度におけるTN濃度を地点ごとに算出する

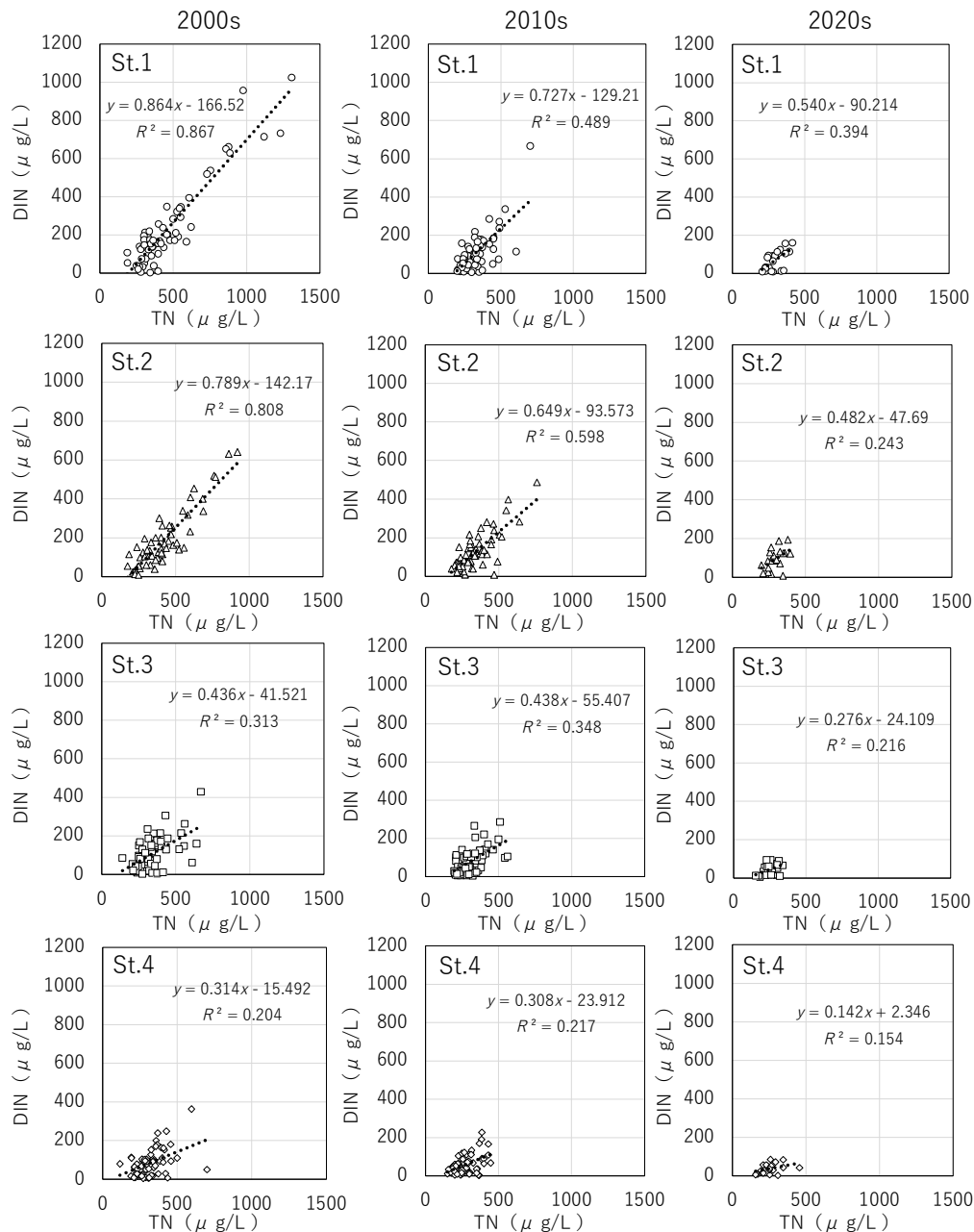


Fig. 9 Relationship between DIN and TN of nori farming season (Oct-Mar) at each sampling station in Chita Bay. The dotted lines in each figure indicate regression equations.

と、TN 濃度はそれぞれ St.1 で 316 $\mu\text{g/L}$ 、St.2 で 299 $\mu\text{g/L}$ 、St.3 で 310 $\mu\text{g/L}$ 、St.4 で 338 $\mu\text{g/L}$ となった。

年代別の TP 濃度に対する DIP 濃度の関係と得られた回帰直線を Fig.10 に示した。年代別の TP 濃度と DIP 濃度の関係は、調査点毎で傾向が異なり、St.1、2 では回帰直線の傾きが 2000 年代に比べて 2010 年代では有意に小さく ($p < 0.05$)、2020 年代は 2010 年代と比べて有意ではないが傾きは大きくなった (Fig.10, 2010 年代と 2020 年代の傾きの差; St.1 : $p = 0.176$, St.2 : $p = 0.095$)。一方、St.3 では回帰直線の傾きは経年的に小さくなり ($p < 0.05$)、St.4 では 2010 年代で大きかった ($p < 0.05$)。TP の濃度を回帰

直線に代入し DIP 濃度を算出すると (Table 6)、St.1、3 では年代ごとの明確な傾向はみられず、St.2 では概して 2020 年代において高く、2010 年代では低い傾向となり、St.4 では 2020 年代において低い傾向となった。TN と同様に 2010 年代の回帰式 (St.1, $y = 0.607x - 7.402$, St.2, $y = 0.579x - 6.059$, St.3, $y = 0.488x - 4.267$, St.4, $y = 0.572x - 6.804$) からノリ養殖に必要な DIP 濃度 (St.1, St.2 = 10 $\mu\text{g/L}$, St.3, St.4 = 8 $\mu\text{g/L}$) を満たす TP 濃度を地点ごとに算出すると、TP 濃度はそれぞれ St.1 で 29 $\mu\text{g/L}$ 、St.2 で 28 $\mu\text{g/L}$ 、St.3 で 26 $\mu\text{g/L}$ 、St.4 で 26 $\mu\text{g/L}$ となった。

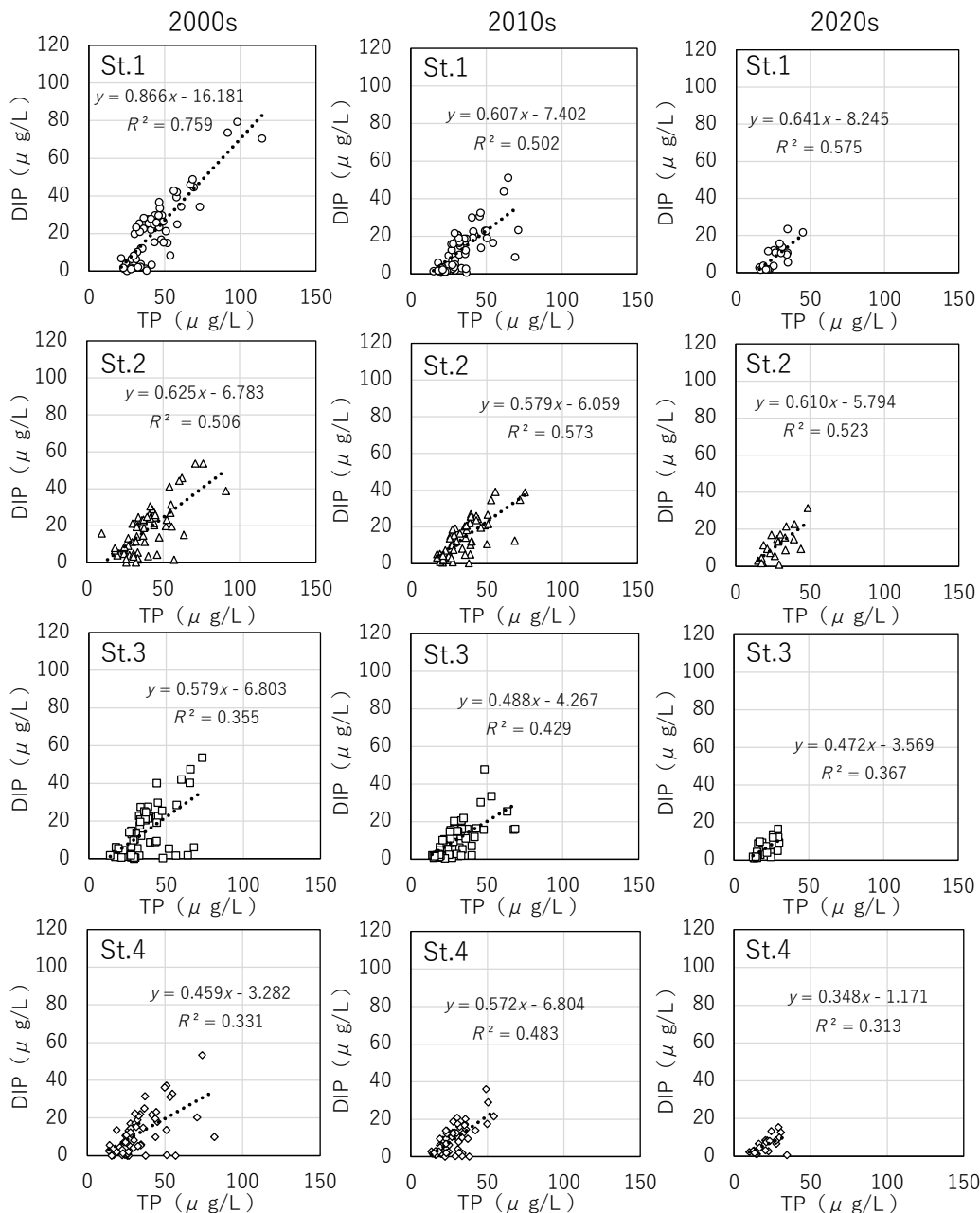


Fig. 10 Relationship between DIP and TP of nori farming season (Oct-Mar) at each sampling station in Chita Bay. The dotted lines in each figure indicate regression equations.

考 察

栄養塩類の長期的変化及びノリ養殖期にみられた特徴

本研究では渥美湾、知多湾ともに TN, TP, DIN 及び DIP の濃度には減少傾向がみられ、これまでの知見で報告された傾向と一致していた。^{1-3, 5, 6)} この経年的な濃度低下の要因としては、水質総量規制による窒素・リンの削減^{1-3, 6)}、下水道普及率の上昇^{2, 5)}、河川での栄養塩濃度の低下^{2, 6)}等が挙げられている。一方、本研究でこれらの傾向について統計的な検証を行った結果、知多湾では TN, TP, DIN 及び DIP 全てが統計的に有意に減少したが、渥美湾では TN 及び TP が有意に減少しており、両

湾でそれらの傾向に差があることが明らかになった。また、2000年代と2010年代以降の TN, TP, DIN, DIP の各濃度、及び DIN/TN 比と DIP/TP 比の平均値を比較すると、いずれも知多湾の方が大きく低下していた。知多湾に流入する矢作川は、渥美湾に流入する豊川に比べ流量が1.8倍多く、^{1, 6)} 河川からの供給量、即ち流入負荷量の減少がより強く反映されていると考えられた。

国分⁴⁾ は、伊勢湾における栄養塩類の長期変動を解析し、TN, TP が長期的に減少していることや、N/P 比が長期的に低下し、Redfield 比^{2, 4)} との比較により、1980年代はリン制限であったが近年は窒素制限へと変化してきていることを報告している。三河湾においては TN/TP 比は

Table 6 DIN and DIP concentrations at each TN and TP concentration level calculated from the relationship equation between TN and DIN, TP and DIP in each decade.

St.1						
TN ($\mu\text{g/L}$)		250	300	350	400	450
DIN ($\mu\text{g/L}$)	2000s	49.5	92.7	135.9	179.1	222.3
	2010s	52.5	88.9	125.2	161.6	197.9
	2020s	44.8	71.8	98.8	125.8	152.8
St.2						
TN ($\mu\text{g/L}$)		250	300	350	400	450
DIN ($\mu\text{g/L}$)	2000s	55.1	94.5	134.0	173.4	212.9
	2010s	68.7	101.1	133.6	166.0	198.5
	2020s	72.8	96.9	121.0	145.1	169.2
St.3						
TN ($\mu\text{g/L}$)		250	300	350	400	450
DIN ($\mu\text{g/L}$)	2000s	67.5	89.3	111.1	132.9	154.7
	2010s	54.1	76.0	97.9	119.8	141.7
	2020s	44.9	58.7	72.5	86.3	100.1
St.4						
TN ($\mu\text{g/L}$)		250	300	350	400	450
DIN ($\mu\text{g/L}$)	2000s	63.0	78.7	94.4	110.1	125.8
	2010s	53.1	68.5	83.9	99.3	114.7
	2020s	37.8	44.9	52.0	59.1	66.2

St.1							
TP ($\mu\text{g/L}$)		20	25	30	35	40	50
DIP ($\mu\text{g/L}$)	2000s	1.1	5.5	9.8	14.1	18.5	27.1
	2010s	4.7	7.8	10.8	13.8	16.9	22.9
	2020s	4.6	7.8	11.0	14.2	17.4	23.8
St.2							
TP ($\mu\text{g/L}$)		20	25	30	35	40	50
DIP ($\mu\text{g/L}$)	2000s	5.7	8.8	12.0	15.1	18.2	24.5
	2010s	5.5	8.4	11.3	14.2	17.1	22.9
	2020s	6.4	9.5	12.5	15.6	18.6	24.7
St.3							
TP ($\mu\text{g/L}$)		20	25	30	35	40	50
DIP ($\mu\text{g/L}$)	2000s	4.8	7.7	10.6	13.5	16.4	22.1
	2010s	5.5	7.9	10.4	12.8	15.3	20.1
	2020s	5.9	8.2	10.6	13.0	15.3	20.0
St.4							
TP ($\mu\text{g/L}$)		20	25	30	35	40	50
DIP ($\mu\text{g/L}$)	2000s	5.9	8.2	10.5	12.8	15.1	19.7
	2010s	4.6	7.5	10.4	13.2	16.1	21.8
	2020s	5.8	7.5	9.3	11.0	12.7	16.2

長期的に上昇しており、伊勢湾とは異なる結果であった。また、水質浄化センターからのリン増加放流が実施された2017年11月以降においては、統計的に有意ではないもののTN/TP比は低下傾向にあった。このことは、水質浄化センターからのリン増加放流が湾全体のTP濃度を上昇させた要因の一つと推察されるが、定量的な把握については今後も取り組みの実施とモニタリングの継続が必要である。

一方で、DIN/DIP比についてはTN/TP比とは異なり渥美湾は横ばい、知多湾は低下傾向であり、2017年11月以降は渥美湾が横ばいに近い低下傾向に転じたが大きな変化はみられなかった。また、本研究の結果では、N/P比は多くの期間でRedfield比²⁴⁾を上回っており、三河湾においてはDIPが植物プランクトンの増殖を律速している状況に変化はないと考えられた。TN/TP比は低下傾向にあることから、DIN/DIP比についても広域流域下水道からの栄養塩増加放流等の取り組みによって、今後、大きく変化してくる可能性もあり、引き続き注視する必要がある。

DIN/TN比、DIP/TP比については、知多湾におけるDIN/TN比 (Fig.2) のみで有意な減少であったが、傾向としては両湾ともに低下していた (Table 4)。また、低下量は知多湾で大きかった。大橋ら¹⁾は1978年から2008年までのデータをもとに三河湾のDIN/TN比の低下を指摘し

ており、その要因として流入負荷の削減と、干潟等の喪失による植物プランクトン等懸濁態有機窒素から溶存無機態窒素への転換系の劣化を挙げている。また、長期変動とは異なるが、山本ら^{27, 28)}は太田川²⁷⁾とその流入域となる広島湾北部海域²⁸⁾のDIN/TN比及びDIP/TP比を調査し、太田川の河川水ではそれぞれ70%及び61%であったのに対し、広島湾北部海域では26%及び39%と低下することを明らかにしている。この低下要因として、海域での植物プランクトン生産による懸濁態への転換に加え、脱窒による溶存態の減少の影響を挙げている。三河湾で周年優占する珪藻類²⁹⁾の増殖速度は、種毎に至適水温は異なるものの、温度が上がるにつれて指数関数的に増大していく³⁰⁾ことや、干潟底泥の脱窒速度は35℃までは直線的に増加する³¹⁾ことが知られている。本県海域においても近年、水温が上昇傾向にあり、^{16, 32)}植物プランクトンの増殖速度や脱窒の速度にも影響を与えている可能性がある。また、2014年以降、愛知県におけるアサリ漁獲量は急減しており、^{6, 7, 14)}植物プランクトンへの摂食圧が低下したために懸濁態から溶存態への転換系が大きく劣化していると考えられる。DIN/TN比及びDIP/TP比は知多湾において低下量が大きいことから、その要因として河川からの供給の減少が大きいと考えられるが、水温上昇に伴う植物プランクトン増殖速度や脱窒速度の増大に加え、知多湾沿岸の一色干潟などでのアサ

リ等二枚貝類減少に伴う懸濁態から溶存態への転換系の劣化が生じていることが影響として大きい可能性が考えられる。

蒲原ら⁵⁾は知多湾の DIN 及び DIP 濃度のピークが 2013 年以降では 10 月から 11 月へと 1 か月遅れていることや、良質なノリの生産に必要な栄養塩レベルを上回る期間が短くなることで生産の早期終了が起こることを報告している。本研究ではノリ漁期においてより詳細な解析を行ったが、知多湾の DIN 濃度は減少傾向であり、2012 年頃からそれまでよりも早い 1 月から 40 $\mu\text{g/L}$ を下回ることが多くなっていた。また、知多湾の DIP 濃度は 1 月で特に経年的な減少が認められ、ノリ漁期が早期終了するようになったという先行知見⁵⁾を裏付ける結果となった。一方、年代別の TN に対する DIN の濃度は経年的に減少傾向であったが、TP に対する DIP の濃度は、湾奥部では 2010 年代よりも 2020 年代で高く、湾口部では 2010 年代よりも 2020 年代で低くなっており、場所や年代で傾向が異なった。2017 年からのリン増加放流により、放流口周辺では DIP を中心に濃度上昇が確認されており、^{33, 34)}ノリの色調良化が確認されているため（愛知県、<https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/466700.pdf>，2024 年 1 月 12 日）、水質浄化センターからの栄養塩増加放流がノリ漁場に波及し、安定生産に寄与している³⁵⁾ことが、栄養塩環境の変化からも示唆された。

アサリ及びノリの生産に適した TN・TP 濃度条件

アサリを指標として既報で示されている TN、TP 濃度と本研究で得られた長期変化について考察する。藤原ら³⁶⁾は、垂下養殖試験により必要な肥満度を満たす TN 濃度が 0.3mg/L (300 $\mu\text{g/L}$) であり、TN と TP の線形関係から必要な TP 濃度は 0.0407mg/L (40.7 $\mu\text{g/L}$) とした。本研究では三河湾において各年代の TN と TP の関係を解析したが、藤原ら³⁶⁾が目安として示した TN 濃度 0.3mg/L (300 $\mu\text{g/L}$) 時における本研究での TP 濃度は、29.3~37.1 $\mu\text{g/L}$ といずれの年代でも低く (Table 5)、三河湾は大阪湾よりも TN 濃度に対する TP 濃度が相対的に少ないことが明らかとなった。また、本研究における 2010 年代の関係式 (Fig.8) を用いると、藤原ら³⁶⁾による必要な TP 濃度 (40.7 $\mu\text{g/L}$) から算定される TN 濃度は 400 $\mu\text{g/L}$ 前後となる。一方、蒲原ら⁶⁾は知多湾（一部渥美湾）において、アサリの漁獲量が多かった 1998-2006 年の TN 濃度は 391 $\mu\text{g/L}$ 、TP 濃度は 46 $\mu\text{g/L}$ とし、餌料量の目安となるクロロフィル a 濃度は TP 濃度との相関が高いと報告している。さらに、Uchida *et.al.*¹²⁾で示されている全国のアサリ漁場において近傍で観測された TN 濃度とアサリ漁獲量 (CPUA) の関係式¹²⁾を基に、例え

ば一色干潟で約 13,000 トン (2004~2013 年の西三河地区における平均漁獲量) の漁獲がある場合の TN 濃度を推定すると、TN 濃度は 0.473mg/L (473 $\mu\text{g/L}$) となる。Uchida *et.al.*¹²⁾では TP 濃度は示されていないが、本研究の 2010 年代の TN と TP の関係式 (Fig.8) から TP 濃度を試算すると 44.3 $\mu\text{g/L}$ となる。アサリに必要な TN 濃度は、これら 3 つの報告で 391~499 $\mu\text{g/L}$ とややばらつきがあるが、TP 濃度は 41~46 $\mu\text{g/L}$ と類似した。また、三河湾では Redfield 比²⁴⁾よりも N/P 比が高くリン制限となっており、その年代ごとの TN/TP 比に対応した TN 濃度となるため、ばらつきが生じると考えられた。一方、藤原ら³⁶⁾が示した TN 濃度は、この濃度を下回ると減耗が起きる濃度であり、生残の限界に近い濃度であるが、蒲原ら⁶⁾及び Uchida *et.al.*¹²⁾はアサリの漁獲量が 10,000 トン以上あり、アサリが十分生残できる濃度であると考えられる。このことから瀬戸内海においても、アサリ漁業の成立を目標とすれば、三河湾と同水準の TN、TP 濃度が必要な可能性がある。

ここまでの検討結果を踏まえて、本研究における各湾の年平均の TN、TP 濃度とアサリの育成に必要なとされる既往知見のうち、垂下養殖試験である藤原ら³⁶⁾を除いた最低の TN、TP 濃度を比較した。すなわち、TN 濃度は蒲原ら⁶⁾が示した 391 $\mu\text{g/L}$ 、TP 濃度は Uchida *et.al.*¹²⁾の 44.3 $\mu\text{g/L}$ を基準値として考察した。渥美湾の TN (Table 1) は 2000 年代には基準値 (391 $\mu\text{g/L}$) を下回る年があり、逆に 2010 年代にも上回る年があり、一定の傾向はみられなかった。知多湾の TN (Table 1) は 2000 年代には基準値を下回る年があり、2012 年以降は全ての年で基準値を下回った。渥美湾の TP (Table 2) は 2005 年以降の全ての年において基準値 (44.3 $\mu\text{g/L}$) を下回り、また知多湾の TP (Table 2) は 2009 年以降の全ての年において基準値を下回った。また、他の年と比べて、2013 年は TN、TP ともに濃度が低かった。アサリの漁獲量は 2014 年以降急減しており、2007 年頃から餌条件の悪化等を介した育成不良がアサリ資源に影響を及ぼしたと推測されている。⁶⁾ 今回の解析で餌条件の悪化が、アサリの餌料濃度に関係が深い TP においても、渥美湾の 2005 年以降の低下や知多湾の 2009 年以降の低下として現れていたことが分かった。一方、2022 年における知多湾の TN 濃度は 341.8 $\mu\text{g/L}$ と高い値ではなかったが、TP 濃度は年平均 43.5 $\mu\text{g/L}$ と近年では高く基準値に近い値であった。一色干潟漁場における 2023 年の CPUE は高かった³⁷⁾ことから、三河湾のアサリの育成に対しては、TP がより強く影響している可能性がある。この点においても本海域はリン制限であり、生産性を高めるため先行してリン増加

放流を実施したことは合理的であると考えられた。ただし、上述の2022年の知多湾のTP濃度を含め、渥美湾及び知多湾ともにアサリの成育に必要なTN、TP濃度を下回っている状況が継続している点は、今後も栄養塩環境の改善を図ることが重要であることを示唆すると考えられた。

ノリ養殖の制限となる栄養塩と濃度水準は海域によって異なり、東京湾(DIP, 15 µg/L)³⁸⁾と福岡湾(DIP, 12 µg/L)ではリン,³⁹⁾有明海(DIN, 98 µg/L)⁴⁰⁾や瀬戸内海(DIN, 42 µg/L),⁴¹⁾伊勢湾(DIN, 60 µg/L)²³⁾では窒素がそれぞれ制限要因となることが報告されている。三河湾においてはリン制限が示唆されているが、本研究では海域や年代別に、St.1, St.2ではDINで100 µg/L, DIPで10 µg/L, St.3, St.4では80 µg/L, 8 µg/Lを生産に必要な基準値とした。また、DINとDIPの基準値によりTNとTPの濃度を検討した結果、本研究で得られた2010年代のDIN/TNとDIP/TPの回帰式から、DIN基準値を満たすTN濃度は299~338 µg/L, DIP基準値を満たすTP濃度は26~29 µg/Lとなった。また、ノリの生産に必要なTN, TPは、アサリより低い水準であるため、アサリを対象とした栄養塩管理を進めることでノリに必要な栄養塩濃度も満たすことができると考えられた。

以上のとおり、本研究では、三河湾の窒素・リンは経年的な減少や、N/P比の変化を統計的に明らかにし、2017年以降のリンの状況に若干の変化を認めたが、同時に現在の漁場環境はアサリやノリの生産に必要な栄養塩類の水準にないことを示した。また、継続的なモニタリングデータは、時系列解析や施策による変化を捉える上で非常に有効であることが確認された。一方で、栄養塩類よりも直接的に食物連鎖に関係する一次生産への影響把握は今後の課題である。今後は、本研究の調査点よりも更に漁場に近い場所での時系列解析を進めるとともに、水域環境に配慮しながら効果的かつ持続的な栄養塩管理施策に結び付けていけるよう、水質浄化センターからの栄養塩増加放流の定量的な効果把握を継続する必要がある。

要 約

三河湾を渥美湾と知多湾に分け、TN, TP, DIN及びDIPの長期的変化を調べた。両湾ともにTN, TP, DIN及びDIPは長期的に減少傾向がみられた。このうち、渥美湾のTNとTP、知多湾のTN, TP, DIN及びDIPの減少は統計的に有意であった。一方、水質浄化センターからの栄養塩増加放流が開始された2017年11月以降には、TP及びTN/TP比の傾向が変化していた。両湾ともDIN/DIP比とTN/TP比は多くの期間でRedfield比を上回り、三河

湾はリン制限の傾向があると考えられた。DINとDIPでは、渥美湾よりも知多湾の濃度が高い傾向があるが、減少量は知多湾の方が大きかった。DIN/TN比とDIP/TP比も知多湾でより大きく低下していた。TNとTPの関係は年代ごとに変化しており、2000年代よりも2010年代の方がTNに対するTPの割合が小さくなっていた。また、既往知見との比較からアサリの成育にはTPの年平均濃度が45 µg/L程度必要であることが示唆された。近年の知多湾においては良質なノリを生産できる栄養塩濃度に達さない年が増加していた。現在の漁場環境はアサリやノリの生産に必要な栄養塩類濃度の水準にはなく、効果的かつ持続的な栄養塩管理施策が必要であると考えられた。

謝 辞

使用した一連の水質データは、これまでに愛知県水産試験場の研究員、愛知県環境部水質調査船「しらなみ」及び愛知県漁業取締・水質調査兼用船「へいわ」の乗組員により観測が実施された。観測並びに水質分析を実施された皆様に感謝の意を表す。

文 献

- 1) 大橋昭彦・荒川哲也・岡田 元・石田基雄・鈴木輝明 (2009) 三河湾の栄養塩環境とノリ養殖. 海洋と生物, 181, 154-160.
- 2) 曾根亮太・蒲原 聡・鈴木輝明 (2018) 内湾環境の現状とより豊かな海とするための課題. 月刊下水道, 39 (3), 22-28.
- 3) 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.
- 4) 国分秀樹 (2019) 伊勢湾における栄養塩類と水産資源の長期変動. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75 (2), I_1123-I_1128.
- 5) 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.
- 6) 蒲原 聡, 芝 修一, 鶴島大樹, 鈴木輝明 (2021) 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. 水産海洋研究, 85 (2), 69-78.
- 7) 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.
- 8) 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砕石覆砂の効果と環境要因との関連. 愛知水試研報, 26, 17-30.
- 9) 日比野学 (2023) 三河湾一色干潟におけるアサリの資源変動要因. 黒潮の資源海洋研究, 第 24 号, 115-120.
- 10) 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.
- 11) 水産庁 (2023) 水産資源及び漁場環境をめぐる動き. 令和 4 年度水産白書, 102-143.
- 12) Uchida M, Ishihi Y, Watanabe S, Tsujino S, Tezuka N, Takada Y, Niwa K (2023) Trophic state-dependent distribution of asari clam *Ruditapes philippinarum* in Japanese coastal waters: possible utilization of asari stable isotope ratios as a production indicator. Fisheries Science, 89, 203-214.
- 13) 愛知県 (2017) 水環境保全に関する施策. 平成 29 年度版環境白書, 70-88.
- 14) 日比野学・下村友季 (2020) 水産系モニタリングデータの収集と利活用. 海洋と生物, 42, 49-55.
- 15) 阿知波英明 (2008) 愛知県沿岸にある湾の範囲はどこか?—太平洋, 伊勢湾, 三河湾, 知多湾と渥美湾のそれぞれの境界についての考察—. 愛知水試研報, 14, 23-29.
- 16) 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.
- 17) 愛知県 (2001-2023) 平成 12~令和 4 年度公共用水域及び地下水の水質調査結果, 愛知県.
- 18) 西岡昌秋・寶 馨 (2003) Mann-Kendall 検定による水文時系列の傾向変動. 京大防災研年報, 46 (B), 181-192.
- 19) 上村晃平・宮本仁志 (2018) Mann-Kendall 検定による日本での年平均平衡水温の長期経年変化の傾向分析. 水工学会論文集, 74 (4), I_577-I_582.
- 20) Hirsch R.M., Slack J.R., Smith R.A. (1982) Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. Water Resources Research, 18, 107-121.
- 21) 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.
- 22) 愛知県水産試験場 (2004) ノリ養殖テキスト, 80pp.
- 23) 坂口研一 (2005) 伊勢湾の養殖ノリにおける病障害発生の原因究明と軽減法に関する研究. 三重科技セウ研報, 13, 1-55.
- 24) Redfield A.C (1958) : The biological control of chemical factors in the environment. Am.Sci., 46, 205-222.
- 25) 鈴木輝明 (2017) 沿岸環境の再生・創出と豊かな漁業生産—伊勢・三河湾を例として—. 海洋と生物, 39, 554-563.
- 26) 青山裕晃 (2020) 矢作川・豊川中流域の栄養塩濃度の低下. 愛知水試研報, 25, 22-24.
- 27) 山本民次・石田愛美・清木 徹 (2002) 太田川河川水中のリンおよび窒素濃度の長期変動-植物プランクトン種の変化を引き起こす主要因として. 水産海洋研究, 66 (2), 102-109.
- 28) 山本民次・橋本俊也・辻けい子・松田 治・樽谷賢治 (2002) 1991~2000 年の広島湾海中における親生物元素の時空間的変動, 特に植物プランクトン態 C:N:P 比のレッドフィールド比からの乖離. 沿岸海洋研究, 39 (2), 163-169.
- 29) 国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産技術研究所 (2023) 令和 4 年度漁場環境改善推進事業のうち栄養塩, 赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発 (1) 栄養塩の水産資源に及ぼす影響の調査報告書, 119-124.
- 30) 高橋正征 (1997) 3. 赤潮生物の生物学的特徴, 赤潮の科学 第二版, 恒星社厚生閣, 東京, 62-82.
- 31) 岩橋良憲・登千江子・丸山 繁・古川憲治 (2000) 脱窒能に着目した干潟の浄化能の評価. 日本水処理生物学会誌, 36 (3), 153-159.
- 32) 神戸 浩仲 (2020) 地球温暖化の影響に関する考察. 愛知県環境調査センター所報, 48, 37-44.
- 33) 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.
- 34) 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.
- 35) 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.
- 36) 藤原建紀・樋口和宏・藤井智康 (2020) 海産生物の生育に必要な水質 (全窒素・全リン濃度の下限値) の定量化: アサリおよび生物附着板を用いた現地調査. 水環境学会誌, 43 (6), 175-182.
- 37) 日比野学・進藤 蒼・村田将之・平井 玲・鈴木勝海・濱崎真美・市川哲也 (2024) 三河湾一色干潟におけるアサリ資源状況と資源管理. 黒潮の資源海洋研究, 25, 147-158.
- 38) 石井光廣・長谷川健一・松山幸彦 (2008) 東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因: 栄養塩の長期変動および最近の珪藻赤潮発生. 水産海洋研究, 72, 22-29.
- 39) 小池美紀・瀧上 哲 (2013) 溶存態無機リン欠乏がスサビノリ (*Pyropia yezoensis*) に及ぼす影響. 福岡水海技セ研報, 23, 33-42.
- 40) 渡辺康憲・川村嘉応・半田亮司 (2004) ノリ養殖と栄養塩ダイナミクス. 沿岸海洋研究, 42, 47-54.
- 41) 藤澤邦康・小橋啓介・野坂元道 (1999) 牛窓ノリ養殖場におけるノリの色素量変化と水質環境について. 岡山水試報, 14, 4-7.