

## 三河湾における貧酸素水塊の発生状況とその変動要因

河住大雅・柘植朝太郎・松村貴晴

(2025年12月23日受付, 2026年2月9日受理)

### Occurrence of hypoxic water mass and their drivers in Mikawa Bay, Japan

KAWASUMI Taiga\*, TSUGE Asataro\*, and MATSUMURA Takaharu\*

**Abstract:** This study investigated long-term trends and controlling factors of hypoxic water masses in Mikawa Bay from 2000 to 2024. The results revealed a long-term expansion of hypoxic areas. Hypoxic areas exhibit an earlier seasonal onset in June and a delayed dissipation after October, resulting in a prolonged hypoxic period. Monthly analyses from June to October showed that expansions in July and September particularly contributed to the long-term increase of hypoxic areas. Correlation analysis demonstrated strong relationships between hypoxic area and physical factors—especially elevated surface water temperature, reduced salinity, and enhanced vertical density stratification. Multiple regression analyses similarly identified these physical factors as significant drivers of hypoxic variability. Moreover, hypoxic areas have shown a strong negative correlation with Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) harvests in recent years. While no positive correlation was found between TN, TP and hypoxic area, no tendency for hypoxic areas to expand with increasing nutrient levels was observed. These findings suggesting that increasing nitrogen and phosphorus to support the recovery of suspension feeders such as Manila clams may be an effective measure for mitigating hypoxic water masses in Mikawa Bay.

**キーワード:** 貧酸素水塊, 三河湾, アサリ, 成層構造, 栄養塩

三河湾は伊勢湾や東京湾, 大阪湾と比較して湾口部が狭く, 浅い湾であり, 外海水との交換が少ない閉鎖性海域である。三河湾の特徴の一つとして矢作川, 矢作古川, 豊川の河口域をはじめとした広大な干潟域が広がっている点が挙げられるが, <sup>1)</sup>これらの干潟域は大規模な埋め立てによってその多くが消失し, 三河湾東部の渥美湾だけでも約 1,200ha 減少した。<sup>2)</sup>これに伴い, 赤潮の増加や貧酸素水塊の拡大, 苦潮の発生による漁業被害が顕在化したとされている。<sup>3)</sup>海域の貧酸素化は, 漁獲対象種を多く含む底生性魚介類に大きな影響を与えている。大規模な貧酸素水塊が発達する夏季の三河湾は, 底生性魚介類にとって生息困難な環境であると指摘されており, 貧

酸素水塊が浅海域に湧昇することで発生する苦潮はアサリをはじめとする浅海域の生物にも悪影響を及ぼしている。<sup>4)</sup>また, 大規模な埋め立てと並行して造られた浚渫窪地, 航路, 入江, 泊地等の多くはデッドゾーン(生態系機能が低下した海域)と化し, そこで発生する高濃度の硫化水素を含んだ無酸素水が極沿岸海域の生態系の劣化を惹起し, 湾全体の貧酸素化に拍車をかけていることが指摘されている。<sup>5)</sup>

貧酸素水塊発生の原因は, 溶存酸素供給を上回る底層での酸素消費である。夏季は密度躍層が発達し, 表層からの酸素供給が減少する。加えて河川からの負荷量の増加や, 埋め立てなどによる干潟・浅場域の減少による懸

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

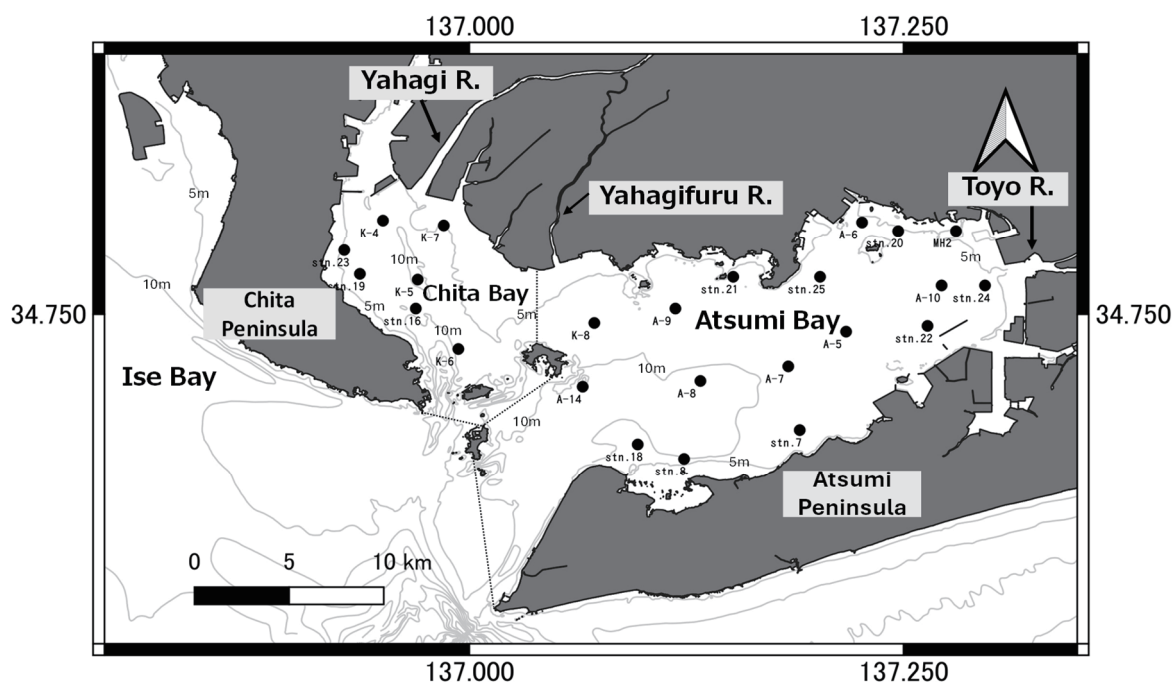


Fig.1 Locations of the 24 observation stations in Mikawa Bay. Data used in this study were collected at these stations.

濁物除去能力の低下により、極度の赤潮が発生すると、大量の有機物が沈降し海底に堆積することとなる。堆積した有機物は、バクテリアにより無機化されるが、この時、酸素が消費され、底層での酸素消費速度が表層からの供給速度を上回る状況が継続すると貧酸素水塊が発達する。<sup>6)</sup>さらに、底層の無酸素化に伴い、底泥に存在する硫酸塩還元菌の嫌気呼吸により産生され、水中に拡散される強力な還元剤である硫化水素の酸素消費により、底層の貧酸素化が強固になる。<sup>7)</sup>また、底泥によって酸素が消費され、<sup>8)</sup>水温上昇によって酸素消費速度が増加することが報告されている。<sup>9)</sup>

伊勢・三河湾では頻発する赤潮や貧酸素水塊への対策として、1979年からCODを指定項目とし、2001年には窒素およびリンを追加した総量削減基本方針が策定され（目標年度2000-2004年度）、現在に至るまで総量規制が行われている。<sup>10)</sup>この総量規制の結果、三河湾の窒素、リンは大幅に減少し、<sup>11, 12)</sup>赤潮の発生件数・延べ日数は近年微減傾向にあるが、<sup>13)</sup>依然として貧酸素水塊の発生には減少が見られていない。<sup>14)</sup>一方で、栄養塩類の減少によって、ノリの色落ち<sup>15)</sup>や、餌不足によるアサリのへい死の発生、<sup>11, 16-18)</sup>マアナゴ、シャコおよびトラフグの長期的な肥満度の低下と資源への影響等、<sup>19-21)</sup>貧栄養化による水産資源への悪影響が指摘されている。

三河湾の貧酸素水塊の発生状況やその規模と環境要因との関係性<sup>22-24)</sup>についてはこれまでも報告がある。黒田・藤田<sup>22)</sup>は、7-9月に貧酸素水塊が大きく消長する

ことを報告している。また、三河湾は貧酸素水塊が形成される条件が常に内在しているため、気象による攪拌や海水交換等の物理的要因が貧酸素水塊の発達に影響を与えていることが示唆されている。本田ら<sup>23)</sup>はTN, TP, 赤潮延べ日数が長期的に有意な減少傾向、透明度は有意な上昇傾向にある一方で、貧酸素水塊面積は長期的に有意な拡大傾向にあると報告している。また、1980年から1997年の期間においては、貧酸素水塊の縮小要因にアサリ年間漁獲量が最も大きく影響しており、1998年以降には面積の拡大に表層の水温差が大きく影響していることを報告している。一方、これらは2010年頃までの解析であり、近年の動向に関する解析事例はない。三河湾の環境は近年、大きく変化しており、集中豪雨の増加<sup>25)</sup>や温暖化に伴う水温の上昇<sup>26, 27)</sup>等の気候変動に加えて、アサリ資源の急減<sup>28)</sup>による貧酸素水塊への影響があると想定される。伊勢湾においては、気候の変動により、湾西部の外洋水流入が弱体化し、栄養塩濃度の低下や貧酸素水塊の悪化を引き起こした可能性が示唆されている。<sup>29)</sup>また、三河湾の一色干潟周辺海域ではアサリをはじめとする懸濁物食者の大幅な減少により貧酸素水塊の発達要因である有機物の沈降量の増加も指摘されており、<sup>30)</sup>近年、三河湾において貧酸素水塊の変動要因に変化が生じている可能性がある。これらのことから本研究では、2024年まで蓄積された調査結果を基に、三河湾における近年の貧酸素水塊の傾向を把握するとともに、水質項目との関連性を明らかにすることを目的とした。

## 材料及び方法

### (1) 貧酸素水塊面積の算定

愛知県水産試験場では貧酸素水塊の発生状況を把握するため、1971年から2026年1月現在まで夏季を対象に月1回から3回の頻度で三河湾の24測点(Fig. 1)の溶存酸素飽和度(DO飽和度)の鉛直観測を実施している。愛知県水産試験場では、貝類や底生生物の生存が困難なDO飽和度30%以下の水塊<sup>3,1)</sup>を「貧酸素水塊」と定義しており、特にDO飽和度10%以下では全ての底生生物の生存が困難であることから、<sup>3,2)</sup>各観測時の底層(海底上1m)のDO飽和度を用いて、GISソフトのスプライン補完法により等値線図を作成し、そこからDO飽和度30%以下および10%以下の水塊が占める面積をそれぞれ算出した。また、本研究での計算対象面積は、ほとんど貧酸素化することがない水深5m以浅の海域や夏季以外にも貧酸素化していると考えられる港湾内を除外した345 Km<sup>2</sup>とした。<sup>2,4)</sup>解析の対象期間は、2000年から2024年とし、貧酸素水塊が恒常的に確認される7-9月(以下、恒常期とする)の3か月平均値及び最大値を算出し、その経年変化を把握した。恒常期の貧酸素水塊面積の3か月平均値は環境要因の関係解析に使用するため、公共用水域水質調査と同日に観測された貧酸素水塊の面積を用いて算出した。最大値についてはより詳細に把握するために恒常期の各観測の最大値を用いた。加えて、6-10月の各月別の貧酸素水塊面積の推移及び、A5地点(Fig. 1)における7-9月の海底からの貧酸素水塊の層厚を算出し、経年変化を把握した。月別の面積推移については、各月の各観測の平均値を解析に使用した。層厚は月1回から3回の観測毎のA5のDO飽和度の鉛直データよりDO飽和度30%以下の層の厚さを算出した。

変動傾向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<sup>3,3, 3,4)</sup>Mann-Kendall検定<sup>3,5)</sup>を適用し、変動傾向の有意性を統計的に検討した。

### (2) 貧酸素水塊の発生面積と環境要因の関係解析

貧酸素水塊の発生面積と環境要因の関係解析には、2000年から2024年度の愛知県公共用水域水質調査結果および公共用水域水質調査と同日に観測された三河湾の貧酸素水塊の面積を使用した(いずれも月1回のデータ)。用いる環境要因は密度躍層の形成に影響する表層水温、表層塩分、A5及びK5表底層の密度差、水質汚濁の指標である化学的酸素消費量(COD)、全窒素(TN)、全リン(TP)、クロロフィルa(Chl-a)、透明度及び底層TN(A5, K5のみ)、底層TP(A5, K5のみ)とした。表底層の密度差、底層TN、

底層TPを除く項目については10測点(A5, A6, A7, A8, A9, A10, K4, K5, K6, K7)の表層(0m)のデータの平均値を使用して貧酸素水塊面積との相関分析を行った。相関分析は、6-10月の5か月の各月について行った後、これらを類似性の高い2つのグループに分け、それぞれのグループについて、平均値を算出し、再び相関分析を実施した。なお、グループについては貧酸素水塊の形成、解消する時期である6月と10月(以下、形成解消期とする)及び、恒常期の7-9月とした。

加えて、恒常期の貧酸素水塊平均面積とアサリの漁獲量について相関分析を行った。解析期間は、漁獲量データ<sup>3,6)</sup>のある2000年から2023年と漁獲量が激減する数年前かつ、貧酸素水塊の極大が一度縮小した2011年から2023年とした。各月の貧酸素水塊面積を従属変数、それぞれの水質項目を独立変数として重回帰分析を行った。水質項目はTN, TP, 表層水温, 表層塩分, 透明度, COD, Chl-a, 底層TN(A5, K5平均), 底層TP(A5, K5平均), A5とK5の表底層の密度差とした。アサリの漁獲量は年間漁獲量データのみであったため、本分析における独立変数には含めなかった。このうち、多重共線性を避けるため、独立変数同士の相関係数が $|r| = 0.8$ を超えるものは除外して重回帰分析を行った。モデル選択にはフリー統計ソフト「R」のbestglmパッケージのbestglm関数を用いて、BICが最小となる独立変数の組み合わせ総当たり法により抽出し、最適モデルとした。重回帰分析は、上記相関解析と同様に、形成解消期と恒常期の2グループを対象に実施した。各グループにおいて解析期間は相関解析と同様に2000年から2024年とした。

### (3) 表層水温、表層塩分、密度差及び、矢作川、豊川の河川流量とアサリ漁獲量の経年変化

表層水温、表層塩分、A5及びK5の表底層間の密度差、矢作川及び豊川の河川流量及び愛知県のアサリ漁獲量の経年変化の把握を目的として、Mann-Kendall検定<sup>3,5)</sup>により、変動傾向を検討した。水質については、2000年から2024年度の愛知県公共用水域水質調査の結果を用いた。このうち表層水温、表層塩分については6-10月の表層データを平均したものを各年の値とした。密度差は6-10月のA5及びK5の表底層の水温、塩分から密度を算出し、各年の平均値を求めた。

河川流量については、国土交通省水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>, 2025年12月16日)の矢作川下流域の西尾市米津町にある中部地方整備局米津水位観測所と豊川下流域の豊川市当古町にある中部地方整備局当古水位観測所において観測された2004年から2023年の矢作川及び豊川の6-10月までの平均流量から各

年の平均値を算出した。

アサリ漁獲量については東海農林水産統計年報の愛知県のアサリの年間漁獲量<sup>36)</sup>を利用した。

## 結 果

### (1) 三河湾における貧酸素水塊面積の経年変化

三河湾の恒常期の貧酸素水塊の平均面積および最大面積の経年変化を Fig. 2 に示した。貧酸素水塊の平均面積は、D0 飽和度 30%以下は有意な拡大傾向(Mann-Kendall test  $\tau = 0.297, p < 0.05$ )がみられたが、10%以下は有意な拡大傾向はみられなかった( $\tau = 0.233, p = 0.10$ )。30%以下の貧酸素水塊の変動傾向を詳細にみると、2000年から2006年にかけては拡大傾向で、2006年に過去25年間で最大となった。その後、2011年まで横ばいで推移したが、2012年から2013年にかけて縮小した後、再び拡大傾向に転じ、以降、拡大傾向が続いた。D0 飽和度 10%以下の面積についても、概ね 30%以下の面積と同様の変動傾向となっていた。

貧酸素水塊の最大面積については、D0 飽和度 30%以下および 10%以下の両者で有意な拡大傾向がみられた(D0 飽和度 30%以下,  $\tau = 0.297, p < 0.05$ ; D0 飽和度 10%以下,  $\tau = 0.413, p < 0.01$ )。

### (2) 月別の貧酸素水塊面積の経年変化

6-10月における各月の貧酸素水塊面積(D0 飽和度 30%以下)の経年変化を Fig. 3 に示した。6月は、多くの年で貧酸素水塊が形成されているものの、2002年から2006年や2014年から2018年は比較的面積が小さく、長期的に有意な拡大傾向はみられなかった( $\tau = 0.207, p = 0.154$ )。7月の貧酸素水塊面積は、長期的に有意な拡大傾

向がみられた( $\tau = 0.287, p < 0.05$ )。また、2000年代には年ごとの変動が大きかったが、2010年代以降は経年的に拡大する傾向となった。8月は各年とも概ね高位で推移した( $\tau = 0.08, p = 0.591$ )。9月は長期的に有意な拡大傾向はみられなかった( $\tau = 0.247, p = 0.088$ )。10月は、2000年代前半までは貧酸素水塊は確認されなかったが、2000年代後半以降は恒常的に確認されるようになり、長期的に有意な拡大傾向がみられた( $\tau = 0.291, p < 0.05$ )。

対象期間中、各年における貧酸素水塊の最大面積が記録されたのは8月が13回と最も多く、次いで7月が8回、9月が4回だった。各年7-9月のD0 飽和度 30%以下の平均面積と、各月のD0 飽和度 30%以下の面積の相関係数を見ると(Table 1)、7月と9月は特に高い正の相関が認められた( $p < 0.01$ )。

### (3) 貧酸素水塊の層厚の経年変化

A5地点における貧酸素水塊の層厚の経年変化を Fig. 4 に示した。2017年以降、層厚 6 m以上がそれまでよりも高頻度で記録されたが、長期的な増大傾向はみられなかった( $\tau = 0.093, p = 0.068$ )。一方、同観測時の貧酸素水塊の面積との間には有意な正の相関がみられた( $y = 26.703x + 76.568, r = 0.603, p < 0.01$ )。

### (4) 貧酸素水塊の拡大要因の検討

#### ① 相関分析

三河湾の貧酸素水塊面積(6-10月までの各月の面積、形成解消期および恒常期の面積)と各水質項目との相関係数を Table 2 に示した。貧酸素水塊面積と表層水温、表層塩分、A5 及び K5 の表底層密度差は、多くの月やグループで有意な相関がみられた。月毎にみると6月は貧酸

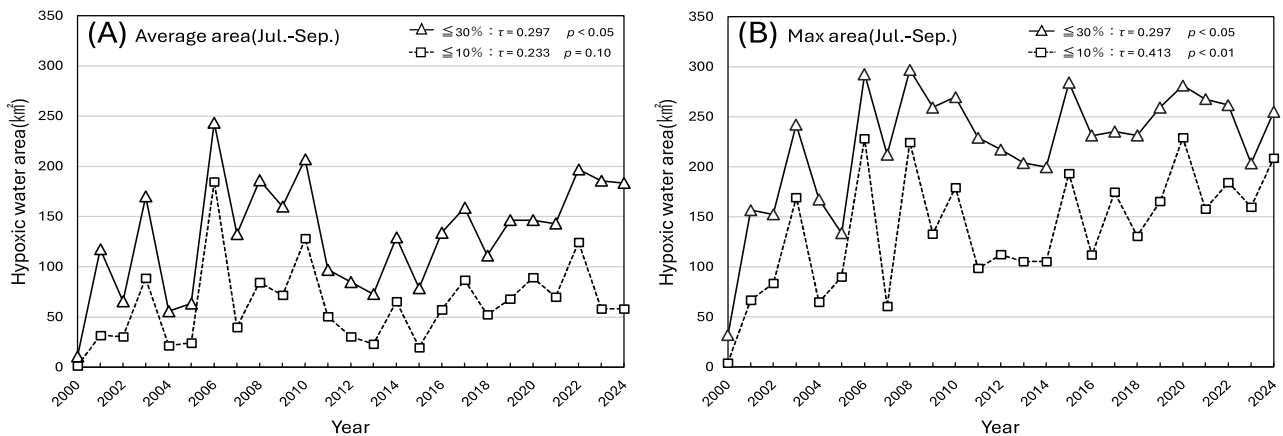


Fig.2 Long-term trends in average (A) and maximum (B) hypoxic water areas with less than 30% ( $\Delta$ ) and 10% ( $\square$ )saturation in Mikawa Bay from 2000 to 2024. The  $\tau$  and  $p$ -values in the figure show the results of the Mann-Kendall test.

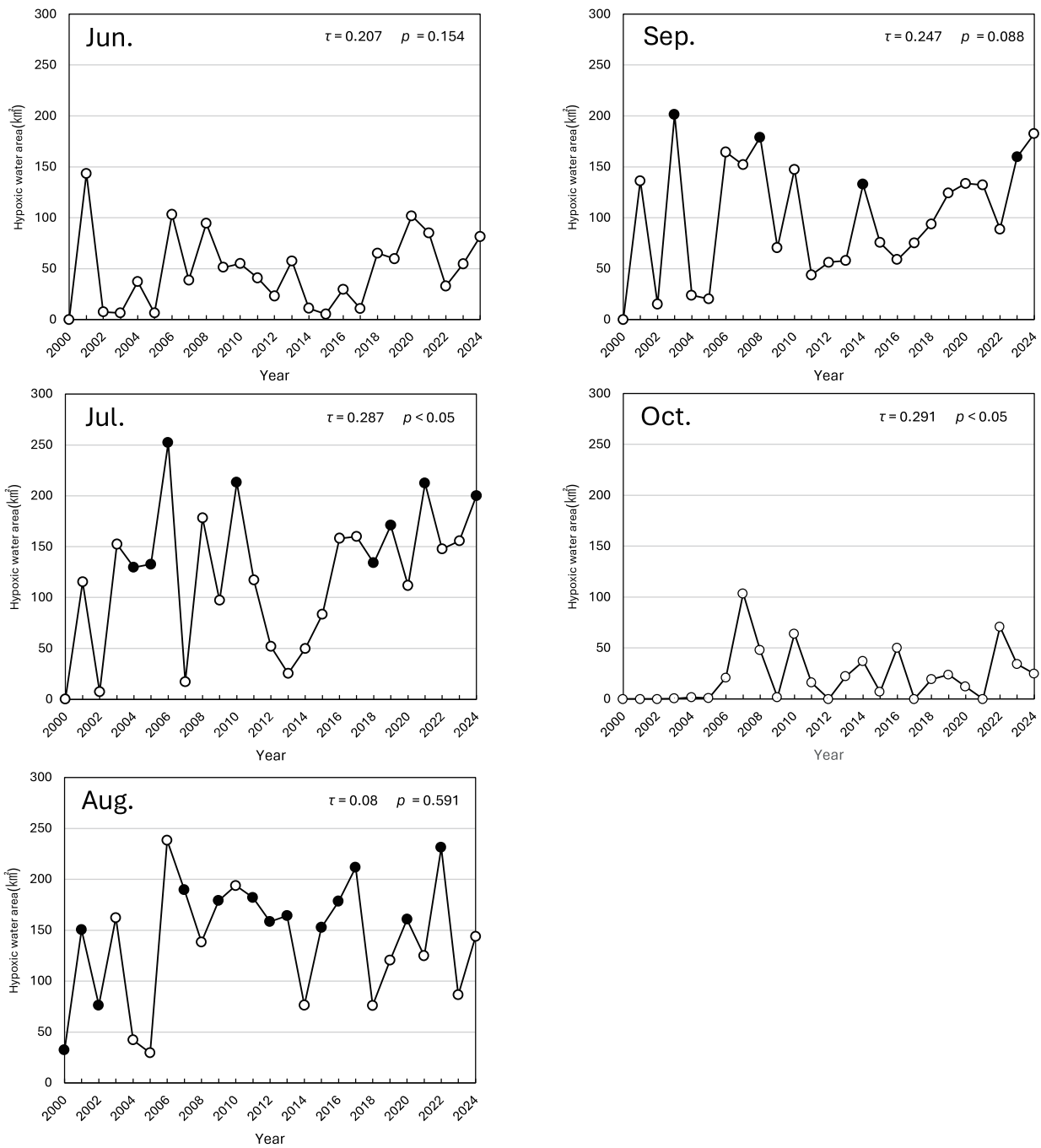


Fig.3 Long-term trends in monthly hypoxic water areas with less than 30% saturation in Mikawa Bay from June to October during 2000 to 2024. The solid circle indicates the maximum hypoxic water areas for each year. The  $\tau$  and  $p$ -values in the figure show the results of the Mann-Kendall test.

素水塊面積と表層水温との間のみ有意な正の相関 ( $p < 0.05$ ) がみられた。7月 は 貧 酸 素 水 塊 面 積 と 多 数 の 水 質 項 目 と の 間 に 有 意 な 相 関 が み ら れ、COD ( $p < 0.05$ ), Chl-*a* ( $p < 0.05$ ), A5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.05$ ), K5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.05$ ) と は 有 意 な 正 の 相 関、表 層 塩 分 ( $p < 0.05$ )、透 明 度 ( $p < 0.05$ ) と は 有 意 な 負 の 相 関 が み ら れ た。8月 は A5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.01$ ), K5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.01$ ) と 有 意 な 正 の 相 関 が、表 層 塩 分 ( $p < 0.01$ ) と

の 間 に 有 意 な 負 の 相 関 が み ら れ た。9月 は 表 層 水 温 ( $p < 0.05$ ), A5, K5 の 底 層 TP ( $p < 0.01$ ), A5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.001$ ), K5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.01$ ) と 有 意 な 正 の 相 関、表 層 塩 分 と の 間 に 有 意 な 負 の 相 関 ( $p < 0.01$ ) が み ら れ た。10月 は す べ て の 項 目 で 有 意 な 相 関 は み ら れ な か っ た。ま た、恒 常 期 に は A5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.001$ ), K5 の 表 底 層 密 度 差 ( $p < 0.05$ ) と 有 意 な 正 の 相 関、表 層 塩 分 と の 間 に 有 意 な 負 の 相 関 ( $p < 0.01$ ) が み ら れ た。一 方

Table 1 Correlation coefficients between the mean area with DO saturation below 30% from July to September in each year and the monthly areas with DO saturation below 30%.

	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.
Jul.-Sep.	0.46	0.74	0.65	0.79	0.43

で形成解消期には表層水温とのみ有意な正の相関 ( $p < 0.05$ ) がみられた。

恒常期の貧酸素水塊平均面積とアサリ漁獲量との間には 2000 年から 2023 年の期間では有意な相関がみられなかったが ( $y = -13.494x + 11454, r = -0.127, p = 0.540$ ), 2011 年から 2023 年の期間では有意な負の相関 ( $y = -117.23x + 22167, r = -0.747, p < 0.01$ ) がみられた。

## ②重回帰分析

重回帰分析の結果を Table 3, Table 4 に示した。形成解消期の貧酸素水塊面積と水質項目との分析結果では、表層水温のみが独立変数として採用され、その係数の符号は正であった (Table 3)。恒常期の貧酸素水塊平均面積と水質項目との分析結果では底層 TP と A5 の表底層密度差が独立変数として採用され、その係数の符号は両者ともに正であった (Table 4)。選択されたすべての独立変数は統計的に有意だった。

また、得られた重回帰式より実際の貧酸素水塊面積の変動の再現度を Fig. 5 に示した。形成解消期の決定係数  $R^2$  は 0.113 (Fig. 5A) であり、恒常期の決定係数  $R^2$  は 0.436 (Fig. 5B) であった。形成解消期においては、再現

性は低かったが恒常期においては一定の再現性を示した。  
(5) 表層水温、表層塩分、密度差、矢作川、豊川の河川流量とアサリ漁獲量の経年変化

三河湾の表層水温、表層塩分、A5、K5 の密度差、矢作川、豊川の河川流量の年平均値及びアサリ漁獲量についてその経年変化を Fig. 6 に示した。表層水温 (Fig. 6A), A5, K5 の密度差 (Fig. 6C), 矢作川、豊川の河川流量 (Fig. 6D) については有意な上昇傾向がみられた (表層水温:  $\tau = 0.413, p < 0.01$ , A5 密度差:  $\tau = 0.413, p < 0.01$ , K5 密度差:  $\tau = 0.467, p < 0.01$ , 矢作川河川流量:  $\tau = 0.337, p < 0.05$ , 豊川河川流量  $\tau = 0.326, p < 0.05$ )。表層塩分 (Fig. 6B), アサリ漁獲量 (Fig. 6E) については有意な下降傾向がみられた (表層塩分:  $\tau = -0.420, p < 0.01$ , アサリ漁獲量:  $\tau = -0.370, p < 0.05$ )。

## 考 察

### (1) 貧酸素水塊面積の経年変化

三河湾の恒常期における貧酸素水塊の平均面積 (30% 以下) は 2000 年以降、有意な拡大傾向だった (Fig. 2A)。月毎にみると、7 月は長期的に有意な拡大傾向にあった。9 月は長期では有意な拡大傾向はなかったが 2010 年代には 100 Km<sup>2</sup> を下回ることが多かった貧酸素水塊が近年では 100 Km<sup>2</sup> を上回る頻度が多くなっていた。8 月は高位で維持されていた (Fig. 3)。また、7 月と 9 月の面積は恒常期の平均面積との間に高い正の相関がみられた (Table 1)。これらのことから 7 月および 9 月の貧酸素水塊の拡大が恒常期の平均面積の拡大に寄与していると考えられた。一方、8 月が高位で維持されていた要因として、8 月

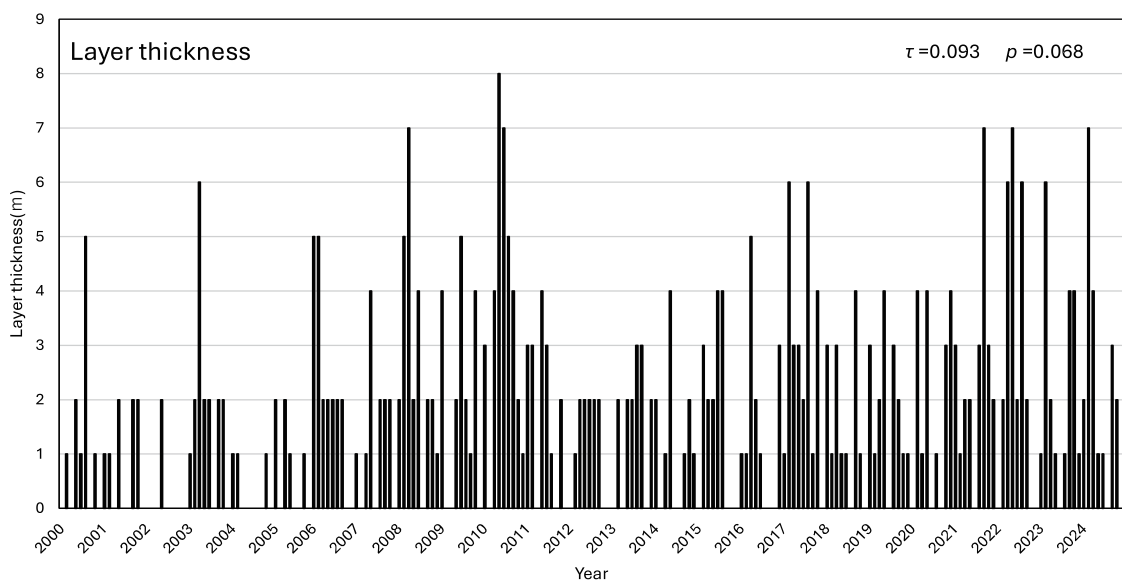


Fig. 4 Long-term trends of hypoxic layer thickness with less than 30% saturation at A5 from 2000 to 2024. The  $\tau$  and  $p$ -values in the figure show the results of the Mann-Kendall test.

Table 2 Correlation coefficients between the area of hypoxic water masses with DO saturation below 30% in Mikawa Bay and various environmental factors.

Month	TN	TP	Water temperature	Salinity	Transparency	COD	Chlorophyll a	Bottom TN (A5,K5)	Bottom TP (A5,K5)	Density Difference (A5)	Density Difference (K5)
Jun.	0.02	-0.24	0.44	0.05	0.21	0.01	-0.19	-0.06	-0.04	-0.02	0.11
Jul.	0.21	0.17	0.33	-0.43	-0.46	0.46	0.39	0.04	0.31	0.50	0.43
Aug.	0.11	-0.39	0.07	-0.61	-0.25	0.17	-0.16	0.11	0.12	0.63	0.52
Sep.	-0.15	-0.29	0.42	-0.53	-0.12	0.20	-0.32	0.06	0.61	0.71	0.55
Oct.	-0.28	-0.11	0.27	0.24	0.06	0.01	-0.12	0.03	0.25	-0.07	-0.14
Jul.-Sep.	0.01	-0.39	0.28	-0.53	-0.29	0.33	0.09	0.08	0.23	0.72	0.47
Jun.,Oct.	-0.28	-0.25	0.43	0.07	-0.04	0.14	-0.08	-0.15	-0.01	0.19	0.18

□:  $p < 0.05$    □:  $p < 0.01$    ■:  $p < 0.001$

Table 3 Multiple regression analysis results for the area of hypoxic water masses with DO saturation below 30% in Mikawa Bay in June and October and related environmental factors.

Variables	Coefficient		t value	p value
	Estimate	SE		
(Intercept)	-135.378	67.093	-2.018	$p < 0.05$
Surface water temperature	7.288	2.954	2.467	$p < 0.05$

Table 4 Multiple regression analysis results for the area of hypoxic water masses with DO saturation below 30% in Mikawa Bay from July to September and related environmental factors.

Variables	Coefficient		t value	p value
	Estimate	SE		
(Intercept)	-32.033	28.459	-1.126	0.264
Bottom TP (A5, K5)	1.462	0.457	3.196	$p < 0.01$
Density Difference (A5)	18.371	3.071	5.983	$p < 0.01$

の貧酸素水塊面積は 2000 年代の半数以上の年で 2000-2024 年の恒常期の貧酸素水塊の平均面積(131 Km<sup>2</sup>)を上回っており、8 月は 2000 年代以前を含めて恒常的に大規模な貧酸素水塊が形成される時期<sup>2,2), 2,4)</sup>であるため、面積拡大の余地が他の月に比べて少なかったことが原因として考えられる。また、貧酸素水塊の層厚は長期的に有意な拡大傾向はなかったが(Fig. 4)、近年層厚が 6 m 以上となる頻度が増加していた。加えて、貧酸素水塊面積と A5 の貧酸素水塊の層厚との間に有意な正の相関( $p < 0.01$ )がみられたことから貧酸素水塊面積の拡大に伴っ

てその体積も近年拡大している可能性が示唆された。

三河湾において、2000 年代前半までは 6 月から貧酸素水塊が発達することや、10 月まで維持することは極めて少なく、既報と同様であった。<sup>2,2), 2,4)</sup>一方、本研究では、2000 年代後半から 6 月には貧酸素水塊が発達し、10 月においても維持される状況が常態化するようになっていた(Fig. 3)。このことから、三河湾の貧酸素水塊は 2000 年代前半と比べて形成される時期が早く、解消も遅くなることによって長期化しているといえる。東京湾において、秋季の水温上昇に伴い成層状態が長期化し、それに伴う貧酸素水塊の解消の遅れによる発生期間の長期化が指摘されている。<sup>3,7)</sup>また、三河湾の水温は、全ての季節で有意に上昇しており、秋季は特に顕著であると報告されている。<sup>2,7)</sup>今回の解析においても、6-10 月の表層の平均水温は上昇傾向にある(Fig. 6A)。また、形成解消期の平均面積とは表層水温のみ相関が高く(Table 2)、重回帰分析においても表層水温のみが変数選択されている(Table 3)。これらのことから、三河湾においても水温上昇が貧酸素水塊の発生期間の長期化に影響を与えていることが示唆された。

## (2) 貧酸素水塊に影響を及ぼす環境要因

三河湾における貧酸素水塊面積と各水質項目の相関分析を行い、近年の貧酸素水塊の拡大要因の検討を行った結果、貧酸素水塊の形成解消期と恒常期では、高い相関を示す項目が異なっていた(Table 2)。形成解消期は、表層水温のみ相関が高かった。一方で恒常期は、表層塩分や A5, K5 の表底層密度差との間に有意な相関がみられた(全て  $p < 0.05$ )。また、重回帰分析においても形成解消

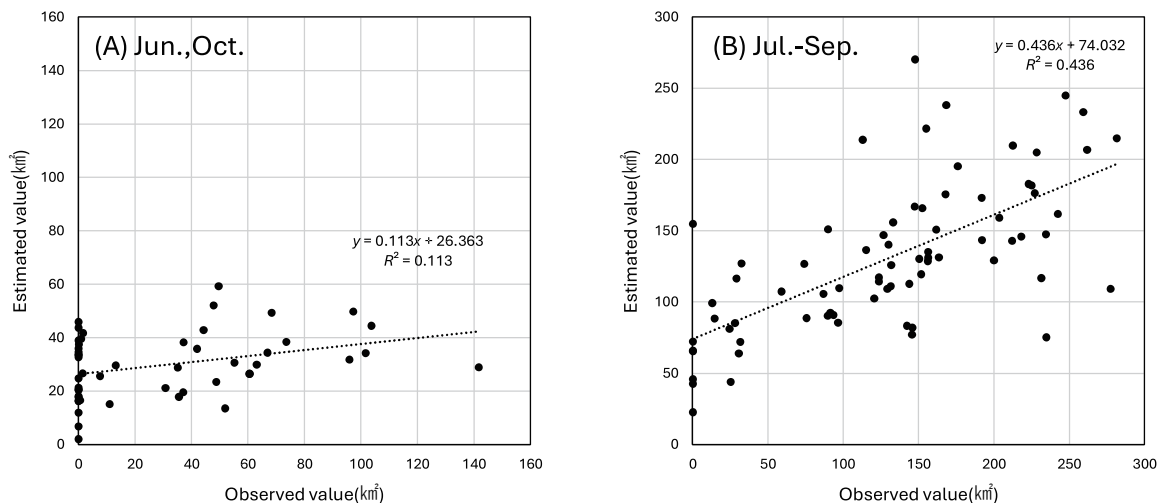


Fig. 5 Scatter plots of estimated and observed values obtained from multiple regression analysis for the area of hypoxic waters with DO saturation below 30% in Mikawa Bay for (A) June and October and (B) July to September. The dotted line in the figure indicates the regression line.

期は表層水温のみ、恒常期は底層 TP と A5 の表底層密度差が独立変数として選択された (Table 3, 4)。これらのことから、表層水温、表層塩分、表底層密度差といった物理的要因が貧酸素水塊の規模に強く影響している可能性が示唆された。形成解消期において表層水温のみが選択された理由として以下のように考えられる。形成解消期における表底層密度差は表層塩分と有意な負の相関がみられたが (A5 表底層密度差:  $y = -0.6501x + 21.215$ ,  $r = -0.794$ ,  $p < 0.01$ , K5 表底層密度差:  $y = -0.6705x + 22.658$ ,  $r = -0.805$ ,  $p < 0.01$ ) 表層水温とは有意な相関はみられなかった (A5 表底層密度差:  $y = -0.1398x + 5.3987$ ,  $r = -0.118$ ,  $p = 0.207$  K5 表底層密度差:  $y = 0.1869x + 7.316$ ,  $r = -0.155$ ,  $p = 0.281$ ) ため、形成解消期の表底層密度差は主に塩分低下に起因して形成され、密度差に対する水温の影響は限定的であると考えられる。加えて、恒常期と比較して形成解消期は成層構造が脆弱であり、密度差の貧酸素水塊の消長への寄与は低いと推測される。そのため、水温上昇に伴い酸素消費量が増加することによって貧酸素水塊が形成されるが、<sup>6)</sup> 密度躍層による酸素供給の阻害の影響は小さいと考えられるため、形成解消期においては表層水温のみが選択されたと考えられた。一方で、恒常期には成層構造が非常に強固であり、鉛直混合による酸素供給が強く阻害されているため、相関分析と重回帰分析の両方で表底層密度差が選択されたと考えられる。また、得られた重回帰式の実際の貧酸素水塊面積の変動の再現度は形成解消期で決定係数  $R^2$  は 0.113 (Fig. 5A)、恒常期で決定係数  $R^2$  は 0.436 (Fig. 5B) と恒常期においては一定の再現性を示したが形成解消期ではその再現性は低かった。計算値は観

測値の変動を概ね捉えていたが、極端な変動は再現できておらず、特に形成解消期で貧酸素水塊が確認されなかった際の再現性が著しく低かった結果、全体の再現性も低くなったと考えられる。

貧酸素水塊面積とアサリの相関分析の結果では、長期では有意な相関がみられなかった一方で、近年においては有意な相関がみられるようになった。このことから、近年において物理的要因に加えてアサリの資源量が貧酸素水塊の面積推移に影響している可能性が示唆された。黒田ら<sup>22)</sup>は、三河湾では常に貧酸素水塊を形成させる条件が内在しているため、気象による攪乱や、海水交換量のような物理的要因が貧酸素水塊の発達に影響を与えていると報告している。本田ら<sup>23)</sup>は、1971年から1997年にかけてアサリの漁獲量が貧酸素水塊面積の縮小要因として最も大きく貢献していたと報告している。一方で、1998年以降の貧酸素水塊の拡大は、表層・底層の水温差拡大に伴う成層構造の強化に起因しており、成層構造の強化に伴う鉛直的な酸素供給の阻害によりアサリ等の懸濁物食者の懸濁物質除去能力が相殺されていたことが指摘されている。三河湾の水温は有意に上昇しており (Fig. 6A)、表層の塩分は河川流量の有意な増加に伴って、低下傾向にある (Fig. 6B, D)。また、アサリの漁獲量についても有意な減少傾向にある (Fig. 6E)。本研究の重回帰分析の結果は、これらの先行知見を支持するとともに、近年の温暖化に伴う水温上昇や集中豪雨の増加<sup>25)</sup>による塩分低下が表底層の密度差の拡大を招き、貧酸素水塊面積の長期化や面積の拡大を助長していることを示唆している。

7月と9月においては物理的要因以外で貧酸素水塊面

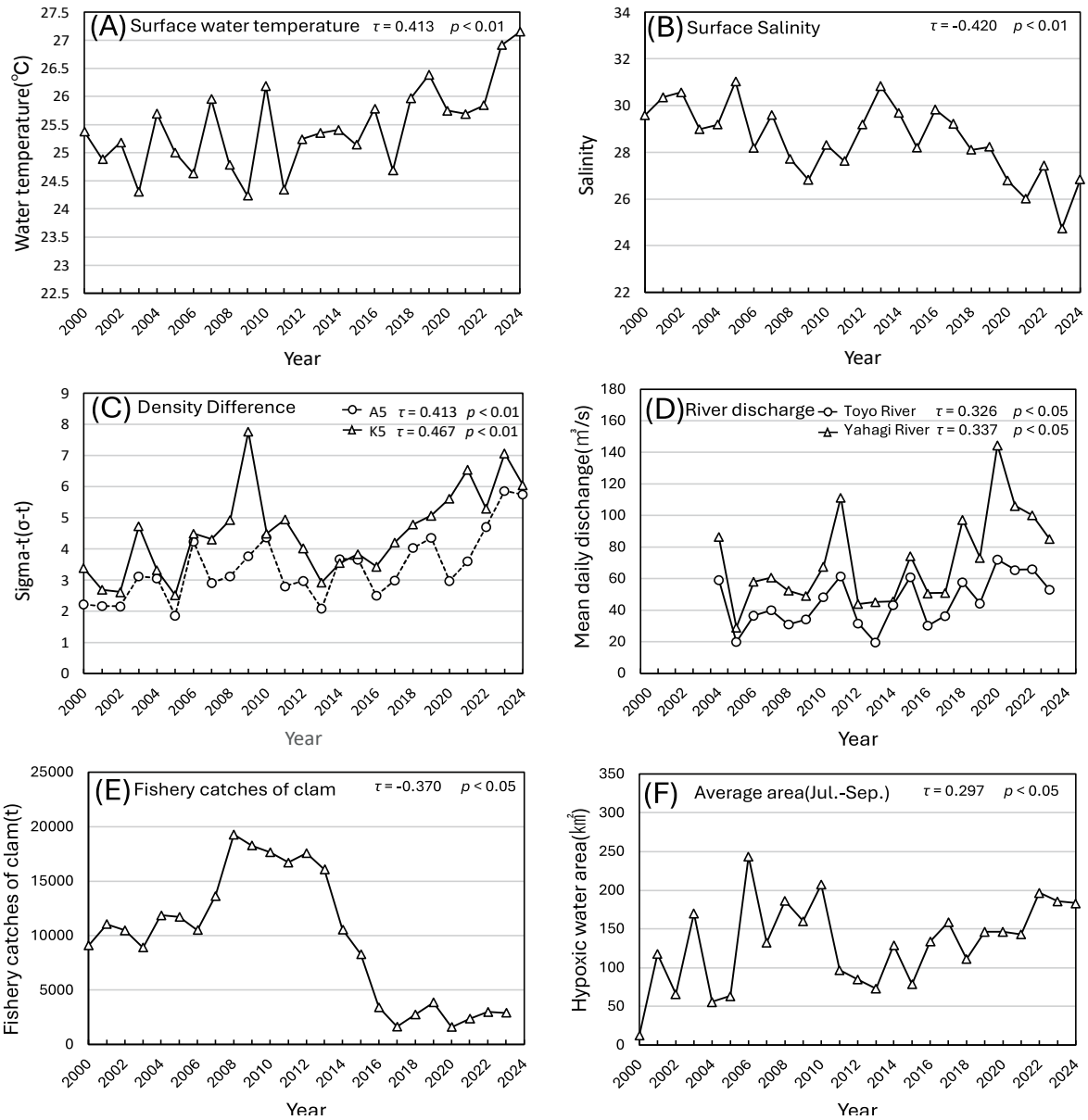


Fig.6 Long-term trends in (A) annual average surface water temperature from June to October, (B) annual average surface salinity from June to October in Mikawa Bay, (C) annual average density difference between the surface and bottom layers at stations A5 and K5 from June to October, (D) annual average river discharge of the Toyogawa and Yahagi Rivers from June to October, (E) annual fishery catches of clams in Aichi prefecture and (F) summertime (July-September) average hypoxic water areas with DO saturation below 30%, from 2000 to 2024. The  $\tau$  and  $p$ -values in the figure show the results of the Mann-Kendall test.

積と有意な相関を示した項目がみられた。このうち7月については表層塩分以外に透明度は負の、COD、Chl-*a*は正の有意な相関がみられた (Table 2)。この場合、貧酸素水塊面積が大きい時は透明度が低く、CODが高く、Chl-*a*が高い状態、即ち植物プランクトンが増殖している状況であると推測される。夏季の降雨は、海域に栄養塩をもたらすと同時に植物プランクトンの急激な増殖を引き起こすことが知られている。<sup>38)</sup> また、梅雨の断続的な降雨の影響を受ける7月は、散発的なゲリラ豪雨や台風による

降雨が主体の8、9月に比べて赤潮延べ日数が多い。<sup>13)</sup> 加えて近年はアサリ資源量の急減に見られるように、<sup>28)</sup> 海域の懸濁物除去能力が著しく低下したため、降雨による植物プランクトンの急激な増殖を制御する機構が十分に機能しなくなっていると考えられる。これらのことから、7月は断続的な出水の影響によって塩分が低下し、成層構造が強化されると同時に、断続的に供給される栄養塩によって植物プランクトンが増殖し、増殖した植物プランクトンがアサリ等の懸濁物食者に十分に除去されな

くなった結果、有意な相関として検出されたと考えられた。よって、断続的な出水に付随した有意な相関である透明度、COD、Chl-aが直接、貧酸素水塊面積に影響を与えたわけではないと考えられた。一方、8、9月の降雨は散発的で、植物プランクトンの増殖が長続きしないため、これらの項目と相関がみられなかった可能性が考えられた。9月については底層TPと正の相関がみられた(Table 2)。貧酸素水塊中では、底泥からのリンの溶出が促進される。<sup>3)9)</sup>そのため、貧酸素水塊面積が大きく、底層TP濃度が高い状況は、鉛直混合があまり生じておらず、成層構造が長期的に安定していることを示していると考えられる。従って、TP自体が貧酸素水塊面積に影響を与えたわけではないと考えられた。

本研究では、従来から貧酸素水塊の拡大の要因であると考えられてきたTN、TPと貧酸素水塊面積の有意な正の相関はみられず、TN、TPの増加とともに貧酸素水塊面積が拡大するような傾向は確認されなかった(Table 2)。徳永ら<sup>4)0)</sup>は底層における酸素消費は、沈降、堆積する有機物の酸化分解に伴う生物的酸素消費量よりも底泥内等で発生する還元物質の酸化に伴う化学的酸素消費量の方が大きい場合があることを指摘している。また山本は、<sup>8)</sup>広島湾においては海底に堆積している難分解性有機物が貧酸素の主要な原因となっており、流入負荷の削減によって貧酸素水塊は軽減されていないことを指摘している。三河湾においても流入負荷の削減による貧酸素水塊の軽減効果は認められず、底質環境の悪化が、貧酸素水塊の悪化に関与している可能性が考えられる。

### (3) 近年の状況をふまえた貧酸素水塊への対策

三河湾において、貧酸素水塊は拡大傾向にあることに加え、発生期間の長期化および近年における層厚の増加が認められ、経年的な悪化の傾向を示していることが明らかとなった。加えて、貧酸素水塊の変動要因として、表層水温や表層塩分、密度差などの物理的要因が大きく影響を与えていると考えられた。また、底質環境の悪化による化学的酸素消費によって貧酸素水塊は形成・拡大しており、貧酸素水塊の改善には浚渫、覆砂等の底質環境の改善が必要であるとの指摘もある。<sup>8)1)</sup>一方で、多くの先行研究において、懸濁物食者による貧酸素水塊の改善への寄与も報告されており、本研究においても、近年の貧酸素水塊面積とアサリ漁獲量の間には有意な相関がみられ、近年のアサリの資源量の急減が貧酸素水塊の拡大要因の一つである可能性が示唆された。

本田らは、<sup>2)3)</sup>アサリの資源量が貧酸素水塊面積の縮小要因として大きく影響しており、アサリのろ過機能による底層への有機物負荷量の減少が貧酸素水塊の縮小要因

として貢献していたことを報告している。また三河湾においては、これまでの研究により、有機物の沈降量を削減するためには負荷量を減少させるよりも二枚貝類等の懸濁物食者の資源量を増やすことが有効であることが明らかとなっている。<sup>2)4)1)4)2)</sup>さらに、一色干潟周辺海域にアサリ等の懸濁物食者が高密度に分布していた2010年と懸濁物食者が大幅に減少した2022年とを比較すると、2022年には海水の有機懸濁物除去能力が大幅に減退して海底への有機物の堆積が増加した可能性が示唆されている。<sup>3)0)</sup>本研究においても、近年のアサリ資源量の急減が貧酸素水塊の拡大に寄与していると考えられ、本結果は上記の既往研究において示された見解と一致するものである。

三河湾においては、総量削減によって海域の窒素やリンの減少とともにChl-a濃度の低下が見られ、餌不足によって<sup>1)2)</sup>アサリの漁獲量も大きく減少している。<sup>2)8)</sup>近年では、海域の生産性がアサリの資源形成において重要であり、一定以上のTN、TP濃度が資源形成に必要なことが示されている。<sup>1)1)4)3)4)4)</sup>そのため、TN、TPと貧酸素水塊面積との相関が低く、むしろ窒素やリンの不足により懸濁物食者が減少している<sup>4)5)</sup>現在においては、アサリ等の資源回復が重要な要素であり、窒素・リンの適切な管理により餌不足を解消し、アサリ資源を回復させることが、貧酸素水塊対策としても有効と考えられる。愛知県では、これまでも干潟・浅場といったアサリの生息場の造成が精力的に実施されているが、<sup>4)6)</sup>生息場の造成とともに、栄養塩管理を進めることによって懸濁物食者に必要な栄養塩類量を担保することがアサリ資源の回復を通じた水質浄化機能の復元、ひいては貧酸素水塊の改善につながると考えられた。

## 要約

三河湾の貧酸素水塊について、2000年から2024年の変動傾向及び変動要因の解析を行った。三河湾の貧酸素水塊は長期的に有意な拡大の傾向にあることが明らかになった。7月および9月の貧酸素水塊面積と恒常期(7-9月)の貧酸素水塊面積との間には特に強い正の相関がみられ、7月および9月の貧酸素水塊面積の拡大が恒常期の貧酸素水塊面積の拡大に寄与していることが示唆された。また、発生期間は2000年代前半よりも早い6月から形成され、解消も10月以降と遅くなっており、発生期間が長期化していると考えられた。さらに、貧酸素水塊の面積は表層水温(正の相関)、表層塩分(負の相関)、密度差(正の相関)と相関が高く、重回帰分析においても表層水温や密度差が独立変数として採用された。また、近年

においては貧酸素水塊の面積はアサリの漁獲量との相関も高くなっていた(負の相関)。このことから、三河湾における貧酸素水塊の形成には表層水温、表層塩分、密度差といった物理的要因が貧酸素水塊の面積拡大に強く影響していることが示唆された。加えて、相関分析の結果からアサリ資源量の減少も貧酸素水塊の面積の拡大に寄与している可能性が示唆された。一方で、従来から貧酸素水塊の拡大の要因であると考えられてきた TN, TP と貧酸素水塊面積の有意な正の相関はみられず、TN, TP の増加とともに貧酸素水塊面積が拡大するような傾向は確認されなかった。窒素やリンの不足により懸濁物食者が減少している現在においては、アサリ等の資源回復を目的として窒素・リンを増加させることが、貧酸素水塊対策として有効であると考えられた。

### 謝 辞

長年にわたる観測や分析などに従事された愛知県水産試験場漁場保全グループの歴代の研究員の皆様および、愛知県漁業取締水質調査兼用船「へいわ」「しらなみ」の乗組員の皆様に心よりお礼申し上げます。

### 文 献

- 1) 鈴木輝明・武田和也・本田是人・石田基雄 (2003) 三河湾における環境修復事業の現状と課題. 海洋と生物, 146, 187-199.
- 2) Suzuki T (2004) Large-scale restoration of tidal flats and shallows to suppress the development of oxygen deficient water masses in Mikawa Bay. Bull. Fish. Res. Agen., 1, 111-121.
- 3) 青山裕晃 (2000) 三河湾における海岸線の変遷と漁場環境. 愛知水試研報, 7, 7-12.
- 4) 曾根亮太・蒲原 聡・山田 智・二ノ方圭介 (2013) 2012 年夏季の三河湾における貧酸素水塊に対する底生性魚介類の分布および 1986 年調査結果との比較. 愛知水試研報, 18, 21-32.
- 5) 和久光靖・金子健司・鈴木輝明・高倍昭洋 (2012) 沿岸域におけるデッドゾーンの分布-三河湾の事例-. 水産海洋研究, 76, 1-10.
- 6) 山本裕也・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. 海洋理工学会誌, 14, 1-14.
- 7) Waku M, Sone R, Inoue T, Ishida T, Suzuki T (2023) Spatial-Temporal Distribution and Interrelationship of Sulfur and Iron Compounds in Seabed Sediments: A Case Study in the Closed Section of Mikawa Bay, Japan. Water, 15(19), 3465.
- 8) 山本民次 (2024) 水質改善しても貧酸素はなくなるらない. 沿岸海洋研究, 62, 1, 15-25.
- 9) 李 洪源・松永信博 (2010) 諫早湾の底泥環境特性. 土木学会論文集 B, 66, 4, 321-334.
- 10) 環境省 (2025) 第 10 次水質総量削減の在り方について. 総量削減専門委員会(第 7 回)議事次第・資料. 175pp. (<https://www.env.go.jp/council/content/49wat-dojo2/000351583.pdf>)
- 11) 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.
- 12) 柘植朝太郎・二ノ方圭介・河住大雅・大澤 博・石田俊朗 (2024) 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. 愛知水試研報, 29, 30-46.
- 13) 河住大雅・松村貴晴・柘植朝太郎・大澤博 (2025) 伊勢湾・三河湾の赤潮・苦潮発生状況. 愛知水試研究業績, C-267, 2-10.
- 14) 河住大雅・二ノ方圭介・柘植朝太郎・大澤 博 古橋徹・小柳津賢吾・松本敏和・杉浦遼大 (2025) 貧酸素水塊状況調査. 愛知県水産試験場業務報告書, 78.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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, 24, 115- 120.
- 19) 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, 10-21.
- 20) 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.

- 21) 荒木克哉・中島廉太郎・阿知波英明・日比野学(2026) 伊勢・三河湾のトラフグにみられる肥満度の低下とその要因. 愛知水試研報, 31, 1-10.
- 22) 黒田伸郎・藤田弘一(2006) 伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較. 愛知水試研報, 12, 5-12.
- 23) 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.
- 24) 石田基雄・原保(1996) 伊勢・三河湾における水質変動と富栄養化について. 愛知水試研報, 3, 29-41.
- 25) 加藤輝之(2022) アメダス3時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去45年間の経年変化. 天気, 69, 5, 247-252.
- 26) 二ノ方圭介・高須雄二・湯口真実・天野禎也(2017) 海況自動観測ブイデータを利用した三河湾東部(渥美湾)における水温, 塩分, 溶存酸素の変動の解析. 愛知水試研報, 22, 22-28.
- 27) 神戸浩仲(2020) 愛知県内の海域, 河川及び湖沼の水温変動傾向と水質データの解析〜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.
- 28) 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.
- 29) Aoki K, Kakehi S, Sogawa S, Hanyu K, Tsuge A, Nakashima R (2025) Regional environmental degradation after mid-2010s, possible links with flow pattern change in a semi-enclosed sea (Ise Bay, Japan). *Regional Studies in Marine Science*, 86, 104205.
- 30) 荒川純平・武田和也・市原聡人(2025) 三河湾の底泥有機物の季節変動及び過去データとの比較. 愛知水試研報, 30, 1-19.
- 31) 日本水産資源保護協会(2018) 水産用水基準第8版. 26-27.
- 32) 風呂田利夫(1991) 東京湾内湾底生動物の生き残り と 繁栄. 沿岸海洋研究ノート, 28, 160-169.
- 33) 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.
- 34) 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.
- 35) 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.
- 36) 東海農政局(2000-2024) 東海農林水産統計年報.
- 37) 石井光廣・長谷川健一・柿野純(2008) 千葉県データセットから見た東京湾における水質の長期変動. 水産海洋研究, 72, 189-199.
- 38) 柘植朝太郎・大橋昭彦・山田智・岩田靖宏・石田基雄(2012) 三河湾東部, 渥美湾における赤潮および貧酸素水塊形成に及ぼす降雨に伴う河川水流入の影響. 愛知水試研報, 17, 9-24.
- 39) 韓銅珍・中辻啓二・西田修三(2005) 閉鎖性内湾の底泥特性と水質・底質の相互作用について. 海岸工学論文集, 52, 966-970.
- 40) 徳永貴久・速水祐一・木元克則(2016) 有明海奥部の2定点における底層水の生物学的酸素消費と化学的酸素消費. 土木学会論文集 B2, 2016, 72, 1, 12-21.
- 41) Suzuki T, K. Ishii, K. Imao, Y. Matsukawa (1987) Box Model Analysis on Phytoplankton Production and Grazing Pressure in a Eutrophic Estuary. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 43, 261-275.
- 42) 渡辺睦美・中田喜三郎(2008) 三河湾の環境修復には何が有効か? -沈降フラックスの考察. 海洋理工学会誌, 14, 2, 51-54.
- 43) 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.
- 44) 日比野学・進藤蒼・曾根亮太・柘植朝太郎・平井玲(2025) 三河湾におけるアサリ漁業が成り立つために必要な栄養塩類と餌料の濃度水準の検討. 水産海洋研究, 89(1), 28-40.
- 45) 愛知県栄養塩管理検討会議(2025) 「漁業生産に必要な望ましい栄養塩管理のあり方」. 愛知県栄養塩管理検討会議報告書, 愛知県, 37pp. (<https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/550095.pdf>)
- 46) 石田基雄・黒田伸郎(2007) 三河湾における環境修復の取り組み. 月刊海洋, 39, 35-43