

京都府農林水産技術センター海洋センター
研究論文

第 11 号

令和 8 年 3 月

SPECIAL REPORT No.11

FISHERIES TECHNOLOGY DEPARTMENT; KYOTO PREFECTURAL
AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES TECHNOLOGY CENTER

March 2026

閉鎖性海域(久美浜湾)の
二枚貝養殖が直面する貧酸素と貧栄養*

船越 裕紀

Hypoxia and oligotrophy faced by bivalve aquaculture
in the semi-enclosed sea area (Kumihama Bay, Kyoto)

Yuki Funakoshi

* 京都大学農学研究科学位審査論文

研究論文集 第11号 令和8年3月
京都府農林水産技術センター海洋センター

SPECIAL REPORT No.11 March 2026

FISHERIES TECHNOLOGY DEPARTMENT; KYOTO PREFECTURAL
AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES TECHNOLOGY CENTER

Odasyukuno, Miyazu, Kyoto 626-0052, Japan

目 次

Abstract

第1章 序論

1.1. 閉鎖性海域（汽水湖）における二枚貝養殖の現状	1
1.2. 久美浜湾の概要と二枚貝養殖が直面する問題	1
1.3. 研究の目的および章構成	2

第2章 養殖被害を及ぼす冬季の中層貧酸素化

2.1. 背景と目的	3
2.2. 材料と方法	3
2.3. 結果	3
2.4. 考察	4
2.5. まとめ	6

第3章 被害防止に向けた貧酸素水塊の季節的な消長機構の解明

3.1. 背景と目的	7
3.2. 材料と方法	
3.2.1. 縦断鉛直観測	7
3.2.2. 定点自動鉛直観測	7
3.2.3. 気象および河川流量	7
3.2.4. 底層の溶存酸素濃度の季節変動	8
3.2.5. 混合指数	8
3.3. 結果	
3.3.1. 自動観測結果と気象および河川流量	8
3.3.2. 縦断鉛直観測結果	
3.3.2.1. 水温・塩分・密度	10
3.3.2.2. 溶存酸素濃度	11
3.3.3. 湾奥底層における溶存酸素濃度の季節変動	11
3.3.4. 混合指数	11
3.4. 考察	
3.4.1. 汽水湖における貧酸素水塊の解消過程	11
3.4.2. 冬季の鉛直混合を阻害する気候的特徴	12
3.5. まとめ	13

第4章 餌料環境改善に向けたクロロフィルの時空間変動機構の解明

—貧酸素水塊および降水との関係性—

4.1. 背景と目的	15
4.2. 材料と方法	
4.2.1. 縦断鉛直観測	15
4.2.2. 栄養塩濃度測定	15
4.2.3. クロロフィル連続自動鉛直観測	16
4.2.4. 気象データ	16
4.3. 結果	
4.3.1. 水温・塩分・密度の季節変動および貧酸素水塊の消長	16

4.3.2.	クロロフィル鉛直分布の季節変動	19
4.3.3.	貧酸素水塊とクロロフィル空間分布の位置関係	19
4.3.4.	短期的なクロロフィル変動と降水との関係	20
4.3.5.	夏季における栄養塩の鉛直分布	20
4.4.	考察	
4.4.1.	久美浜湾における季節的な貧酸素水塊の挙動	21
4.4.2.	夏季の貧酸素水塊直上の中層クロロフィル極大	21
4.4.3.	冬季の中層貧酸素とクロロフィル極大	21
4.4.4.	夏季および秋季の降雨と一時的なクロロフィル増加の関係	22
4.4.5.	養殖深度とクロロフィル極大層の不一致	22
4.5.	まとめ	23
第5章	養殖を支える貧酸素水塊からの栄養塩供給過程	
5.1.	背景と目的	25
5.2.	材料と方法	
5.2.1.	縦断鉛直観測	25
5.2.2.	栄養塩濃度測定	25
5.2.3.	京都府公共用水域水質測定データの解析	25
5.3.	結果	
5.3.1.	湾外水の進入深度の季節変動と湾内の水塊構造	26
5.3.2.	栄養塩分布と溶存酸素濃度およびクロロフィル分布の関係	29
5.3.3.	貧酸素水塊形成期における有機物および栄養塩の鉛直分布	29
5.3.4.	流入河川および湾内表層の栄養塩の季節変動	29
5.3.5.	流入河川および湾内表層の栄養塩の経年変化	30
5.3.6.	湾央部下層および湾奥部における全窒素・全リンの経年変化	30
5.4.	考察	
5.4.1.	貧酸素水塊からの栄養塩供給	31
5.4.2.	河川および湾外からの栄養塩供給	34
5.4.3.	栄養塩の経年的な変化	34
5.5.	まとめ	34
第6章	総合考察	
6.1.	本研究の成果	37
6.2.	冬季の貧酸素被害防止策の検討	37
6.3.	餌料環境改善策の検討	
6.3.1.	冬季から春季の深度調節	37
6.3.2.	二枚貝養殖におけるDX (Digital Transformation) の可能性	38
6.4.	閉鎖性海域における持続的な養殖に向けた提言	38
謝辞	39
引用文献	39
本研究に関する業績	45

Abstract

Kumihama Bay is one of the most highly semi-enclosed sea areas in Japan, where suspended aquaculture of bivalves, including pacific oyster *Magallana gigas*, Japanese cockle *Fulvia mutica* and manila clam *Ruditapes philippinarum*, supports the local coastal industry. However, as observed in many other coastal waters of Japan, recent years have witnessed poor growth and mass mortality of cultured bivalves. It has been widely assumed that hypoxia is typically a bottom-layer phenomenon in summer, and that semi-enclosed coastal waters offer favorable feeding conditions because nutrients are abundant.

Comprehensive understanding of the seasonal dynamics of hypoxic water masses and the spatiotemporal distribution of chlorophyll and nutrients in semi-enclosed waters is essential for identifying the mechanisms underlying winter mass mortality and summer food limitation in bivalve aquaculture and for developing management strategies for sustainable bivalve aquaculture production. In this study, we investigated Kumihama Bay through monthly along-bay transect survey conducted over three consecutive years, complemented by high-frequency automated vertical monitoring. Physical environments and variations in dissolved oxygen (DO), chlorophyll concentrations, pH, and nutrients were analyzed to elucidate the physical and biogeochemical processes governing their seasonal dynamics. Furthermore, recent trends in oligotrophication were examined by integrating these findings with long-term governmental water quality monitoring data.

The results revealed that strong and persistent salinity stratification, formed by freshwater input at the surface, suppresses seasonal vertical mixing and allows hypoxic water masses to persist even during winter. During winter, intrusion of oceanic water outside the bay into the bottom layer displaced the hypoxic bottom water upward, causing hypoxia to reach the bivalve culture depth and triggering mass mortality events. In summer, depletion of nutrients in surface waters led to the formation of a subsurface chlorophyll maximum (5–12 m), resulting in food limitation at typical culture depths (2–4 m). Additionally, nutrients accumulated within hypoxic water masses were released into the mid-layer during autumn to winter, serving as a major nutrient source for the spring phytoplankton bloom. Long-term analyses further indicated declining trends in riverine, outer-bay, and internally stored nitrogen, suggesting a potential reduction in primary production.

Based on these findings, we propose adaptive aquaculture management incorporating real-time monitoring of DO and chlorophyll with dynamic adjustment of culture depth to avoid hypoxia and utilize phytoplankton biomass. These insights also provide a basis for future development of nutrient management strategies supported by low-trophic ecosystem modeling, which could further enhance the sustainable use of semi-enclosed coastal ecosystems.

第1章 序論

1.1. 閉鎖性海域（汽水湖）における二枚貝養殖の現状

主要な食用二枚貝はほとんどが濾過食性であり、海域内の栄養塩を利用して増殖した植物プランクトンや、その死骸であるデトリタスなどの有機物を餌として成長する。成長した二枚貝は漁獲物として海域外に取り上げて消費することから、二枚貝漁業は食糧生産だけでなく、水質改善としての機能も併せ持つ（京都海七, 2013; Kellogg et al., 2013; Saurel et al., 2014; 山口ほか, 2015; Humphries et al., 2016; Bricker et al., 2018 など）。中でも、二枚貝養殖は無給餌であり、天然二枚貝のような資源管理が不要であることから、持続的な漁業の代表と言える。そのため、世界的には二枚貝養殖の生産量は増加し続けており、カキ類およびアサリ・ハマグリ類の生産量は1970年代には100万トンを超える程度であったが、2021年のFAOの統計では1200万トン以上となった。日本国内でも、ホタテを除くアサリやハマグリなどの国内の天然二枚貝の漁獲量が1980年代以降急速に減少する中で、二枚貝養殖の重要性は過去に比べてさらに高まっており、2021年の養殖二枚貝の生産量は、天然二枚貝の生産量を上回る32万トンであった。

閉鎖性海域は、静穏で植物プランクトンが高密度になりやすいことから二枚貝養殖の適地である一方で、海水交換率が低く、貧酸素などの水質の悪化がしばしば問題となる。近年は、日本全国で流入負荷の削減により海域の水質指標が改善しているにも関わらず、貧酸素水塊が依然として発生し、二枚貝の天然資源は回復せず、さらには養殖二枚貝の成育不良が発生している。低調な天然資源や成育不良の原因は、過剰漁獲や食害、貧酸素、高水温など多様かつ複合的であると考えられる（鳥羽, 2017; 日向野, 2024 など）。これらの問題の原因究明のための基礎的な知見として、東京湾や伊勢湾、瀬戸内海など、国や都道府県が計画的に調査するような産業規模の大きい閉鎖性海域の場合、長期的に体系的なデータが蓄積され、物理環境や栄養塩環境、溶存酸素濃度(DO)の変動機構について数多くの研究がある(Magni and Montani, 2000; Fujiwara and Yamada, 2002; Kasai et al., 2004; Kasai et al., 2007; Nishikawa et al., 2010; Kubo et al., 2017; Mino et al., 2023 など)。それらの知見を元に、二枚貝資源の減耗要因や養殖二枚貝の成育不良についての研究も数多く実施されている(Toba et al., 2008; Kodama and Horiguchi, 2011; Kozuki et al., 2013; Ichimi et al., 2019; 蒲原ほか, 2021; 長谷川ほか, 2022 など)。

一方、規模は大きくないものの、産業面および住環境面で、それぞれの地域において重要な役割を持つ閉鎖性海域や汽水湖は国内に無数にあり、これらの海域で

の詳細な物理環境および栄養塩環境、DO、クロロフィル、栄養塩分布の変動機構についての総合的な研究は極めて少ない。研究対象とした京都府京丹後市の久美浜湾もそのような海域の一つである。久美浜湾では1952年から1953年および1970年代に最深点付近において、鉛直的に1年間観測が実施されたほか、1982年4～11月に鉛直縦断観測が実施されたが(柏井, 1989)、それ以降は体系的に観測された記録はない。

久美浜湾は、湾の規模が長辺で約5 kmであるため、地球自転や風の影響が小さく、物理環境の変動要因が少ない。さらに、測点数を密に取った場合でも、一連の観測は短時間で終わるため、観測開始から終了までの変動が小さいため、物理環境の変動機構解明に適している。また、湾口は幅30 m、水深5 mほどの水路でのみ日本海とつながっており、河口は湾口から最も遠い湾奥と湾の東側の2カ所で、それらの部分以外での物質の移動の影響は非常に小さいため、DO・クロロフィル濃度・栄養塩濃度分布の変動機構の解明に最適である。

1.2. 久美浜湾の概要と二枚貝養殖が直面する問題

久美浜湾は、幅30 m、水深5 mほどの水路でのみ日本海とつながっている汽水性の潟湖であり、88海域指定されている日本の閉鎖性海域の中で最も閉鎖度が高い(国際エメックスセンター, 2001)。主な河口域は湾口から最も遠い湾奥と湾の東側の2カ所である。

久美浜湾では、マガキ *Magallana gigas* やトリガイ *Fulvia mutica*、アサリ *Ruditapes philippinarum* などの二枚貝の垂下養殖が盛んであり、マガキ養殖は試験的に1896年に実施された記録があり、本格的には1955年から開始された(乾, 2013)。トリガイ養殖は、京都府海洋センターが養殖技術を確立させた1999年から舞鶴湾で開始され、久美浜湾では2008年から開始された。久美浜湾におけるトリガイの年間生産額は3000万円以上、マガキの年間生産額は1億円以上である。京都府全体の全魚種、全漁法の生産額が40億円程度であることから考えれば、重要な産業と言える。また、久美浜湾近辺は旅館等の観光業も盛んであり、水産物目的での宿泊客も多いことから、水産物の重要性は生産額が表す以上である。

久美浜湾における二枚貝養殖は主に浮き式の筏による垂下式で実施されている。主な生産物であるマガキは5月ごろまで抑制飼育されたのち、ロープにつけて垂下される。低塩分で水温の変化が著しい表層と、夏の下層の貧酸素水塊を避けるため、垂下深度は2-4 mの間であり、3カ所ほどに分けて稚貝を接着して垂下する。湾口付近の養殖場では「丹後とり貝」で有名なトリガイが育成されている。トリガイは殻を閉じた際に隙間が空くため、貧酸素・高温・低塩分への耐性が低く、これらの環境下では他の二枚貝に比べて斃死しやすい(環境庁・水産庁, 1977)。トリガイはマガキと異なり、プラスチックコンテ

ナに基質を敷いたものに、稚貝を入れ、網蓋をして、深度約 4 m において育成する。久美浜湾におけるアサリ養殖もトリガイと同様の方法で実施されている。

他の海域と同様、久美浜湾でも二枚貝養殖は複数の問題に直面している。2015 年から 2016 年にかけての冬に、出荷最盛期であったマガキが原因不明で大量死した。2021 年 1 月にも、湾中央部の西岸で養殖中のマガキの半分以上が斃死した。2022 年の冬には、養殖トリガイの大部分が斃死した。このように久美浜湾では、冬季に数年に 1 度の割合で養殖二枚貝が大量死している。

また、養殖二枚貝の成長が以前に比べて悪くなっている。京都府のトリガイ養殖では、養殖マニュアルを作成して、コンテナ 1 台あたりの収容個数、作業スケジュール、垂下深度、底質の種類および深さなどを定めている(京都府立海洋センター, 2004)。しかし、近年、マニュアル作成当初に設定した収容密度では目標の大きさに育たなくなっているため、漁業者はマニュアルよりも収容密度を下げて養殖している。さらに、「丹後とり貝」に肥満度(身入率)が低い個体が混じることから、2021 年から身入率の基準を策定し、京都府漁業協同組合が運用している。また、久美浜湾では、マガキの収穫に合わせて、過去 30 年にわたり、毎年 12 月上旬に「カキ・魚祭り」が開催されてきたが、2017 年度および 2018 年度は成育不良により中止され、2019 年は 12 月時点の成育が良くなかったため、1 月に延期された。

1.3. 研究の目的および章構成

本研究では、閉鎖性海域(汽水湖)における持続的な二枚貝養殖に必要な貧酸素・貧栄養対策に向け、日本で最も閉鎖度が高く(国際エメックスセンター, 2001)、二枚貝養殖が周辺地域の重要な産業である久美浜湾において、毎月の縦断観測を 3 年にわたって実施するとともに、時間的に密な自動鉛直観測データを併せて解析し、物理環境および DO・クロロフィル濃度・pH・栄養塩分布の変動機構を解明した。また、その変動機構と長期的な公共用水質測定データを併せて解析することで、閉鎖性海域(汽水湖)における近年の貧栄養化の実態を明らかにした。

第 2 章では、1 月における湾内全域の調査により、久美浜湾における冬季の養殖二枚貝の死滅の主な原因を究明し、第 3 章では、秋季から翌春にかけての縦断鉛直観測により、冬季まで貧酸素水塊が残存し、養殖深度に到達する機構を解明した。第 4 章では、1 年を通じた縦断鉛直観測および養殖漁場における高頻度の自動鉛直観測により、クロロフィル分布の季節変動とその変動機構を解明した。第 5 章では、秋季から翌春にかけて、鉛直的な栄養塩濃度分析を 1 か月ごとに実施し、春の植物プランクトンのブルームにつながる栄養塩の供給過程を解明し、公共用水域水質測定データの解析結果と併せてその長期変動傾向を明らかにした。最後に第 6 章で、閉鎖性海域

(久美浜湾)における持続的な二枚貝養殖に向けた貧酸素被害防止策と餌料環境の改善策について提言した。

第2章 養殖被害を及ぼす冬季の中層貧酸素化

2.1. 背景と目的

内湾の貧酸素化は、一般に、夏季から秋季に下層で発生する(藤原, 2014)。久美浜湾でも同様に、夏季に下層で貧酸素水塊が形成されるため、養殖は深度5 m以浅の上・中層で行われている。ところが、2015年から2016年にかけての冬季に、貧酸素が原因と考えられる二枚貝の大量斃死が発生した。この特異的な現象の発生原因を明らかにするため、冬季に久美浜湾全体の水温・塩分、溶存酸素濃度の3次元的な分布を調べた。

2.2. 材料と方法

久美浜湾において、2017年1月26日に調査を実施した。調査は、湾口から湾奥までの縦断線上および4カ所の横断線上の計22測点で行った(Fig. 2-1)。横断線は、佐野谷川の河口付近の養殖場を横切る線をA線、湾中央部の養殖場を横切る線をB線、湾奥の幅が狭くなった部分を横切る線をC線、湾口部の養殖場を横切る線をD線とした。D線上のSt. 1からSt. 3は、湾口から南西に伸びる枝湾の中にあり、この部分の水深は10mよりも浅い。また、St. D3付近ではトリガイ養殖が行われている。本調査では環境システム社製の総合水質計Datasonde5Xを用い、各測点における水温、塩分、DO(溶存酸素)の鉛直分布を測定した。

さらに、本研究では、2011年8月2日および2012年2月7日にSt. 2, 4, 6および9で京都府保健環境研究所が行った鉛直分布調査の結果の提供を受けた。調査は、HYDROLAB社製の多項目水質計H20を用いて実施された。

2.3. 結果

湾口水路のSt. 1(小湊橋)における水温、塩分の鉛直分布をFig. 2-2に示した。深度1-2 mに躍層があり、上層と下層に明瞭に分かれている。海面から深度1 mまでは水温が約4°C、塩分が11-13と低温・低塩分であり、深度2 m以深は水温が約12°C、塩分が約30-32と高温・高塩分であった。なお、DO飽和度は全深度でほぼ飽和(100%)であった。

鉛直縦断面の結果をFig. 2-3に示した。湾全体は成層しており、水温5°C未満の低温で塩分15未満の低塩分の水が深度2 m以浅の上層を覆い、上層水のDOは12-13 mgL⁻¹と高かった。躍層より下では、湾口のSt. 1からSt. 3にかけて、塩分30以上の高塩分で水温12-13°C、DO6-10 mgL⁻¹の海水が広がっていた。一方、St. 5より湾奥では、深度6-10 mの中層に水温が14°C以上と高く、DOが1-4 mgL⁻¹と低い水塊が存在していた。水温とDOの鉛直分布形はよく対応しており、St. 5の深度3.5 m以深では、水温とDOの間に極めて強い負の相関相関係数 $r=-0.99$ があり、高温部ほど低DOであった。

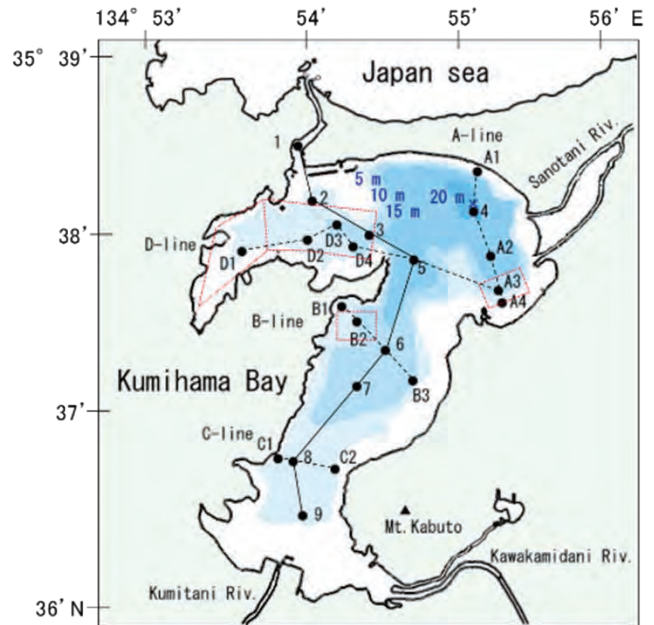


Fig. 2-1 Map showing study area with the water depth (color gradation) and observation stations (solid circles). Dashed line shows the longitudinal transect. Solid lines show the transects (A-transect: A1-4-A2-A3-A4; B-transect: B1-B2-6-B3; C-transect: C1-8-C2; D-transect: D1-D2-D3-D4-5-A3). Red quadrangles indicate bivalve aquaculture areas.

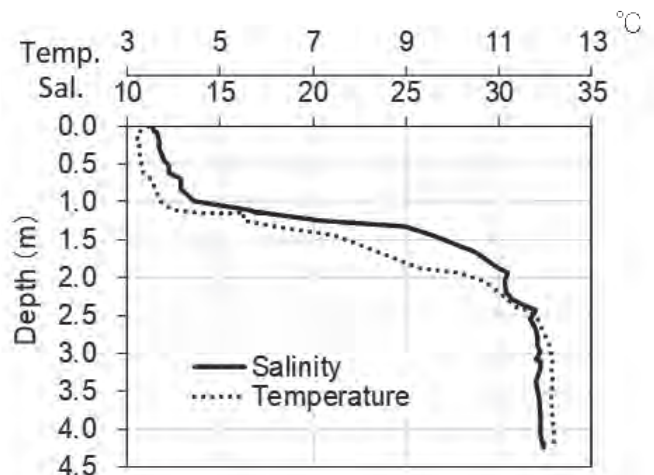


Fig. 2-2 Vertical profiles of salinity and temperature(°C) measured in the bay mouth channel (St. 1) in 26 January 2017.

次に、AからD線における鉛直横断面の結果をそれぞれFig. 2-4に示した。A断面では南側にあたるSt. A2およびSt. A3の深度6-12 mに周囲よりも水温の高い水塊が見られ、この水塊のDOは低かった。特に、St. A3の深度8 mではDOが3.4 mgL⁻¹と、A断面で最も低かった。B断面でも、深度6-12 mの中層に、水温14°C以上の周囲より高温の水塊が見られ、この水塊ではDOが

4 mgL⁻¹以下と低かった。特に、St. B2の深度約10 mではD0が2.8 mgL⁻¹、St. B3の深度約7.5 mでは1.8 mgL⁻¹と低かった。深度の浅いC断面では、B断面中層(深度6-12 m)にみられた高温・低D0の水塊は、深度6 m以深の底層に位置し、C断面中央部の海底は水温14℃以上、D0が2 mgL⁻¹以下の貧酸素水が覆っていた。

D断面のSt. D1からD4(枝湾)の深度6 m以深の下層の水温は12℃台であり、St. 1の深度3 m以深およびSt. 2の深度5 m以深の湾口下層の水温(Fig. 2-3)と等しく、D0も6.5 mgL⁻¹以上と同様であった。一方、St. 5およびSt. A3では、深度6-10 mの中層に水温14℃以上でD0 4 mgL⁻¹以下の高温・低D0の水塊が認められた。

2012年2月7日の鉛直縦断面の結果をFig. 2-5に示した。湾口にあたるSt. 2からSt. 6にかけて、底層には中層よりも低温の13℃台の外海系水が認められた。St. 6より湾奥側では、水温15℃以上の海水が深度4-10 mの中層に存在し、この高温水のD0は1 mgL⁻¹未満であった。

夏季の2011年8月2日の調査データをもとに作成したSt. 4における水温・塩分・D0飽和度の鉛直分布をFig. 2-6に示した。なお、この鉛直分布はSt. 6においても同様であった。深度2 m付近までのごく表層は塩分30以下の汽水であり、深度4 m付近までは低塩分で高温の海水が覆っていた。深度6 m以深は水温の低下が顕著になり、表層との水温差は約10℃であった。D0飽和度は、深度6 m以浅では80-100%であったが、深度6-9 mで急減し、深度9 m以深では無酸素(D0 0 mgL⁻¹)であった。

2.4. 考察

本研究で得た結果から推察される冬季の久美浜湾中層における貧酸素化の形成過程をFig. 2-7に模式的に示した。冬季に湾口から進入した湾外水が、久美浜湾の底層付近に進入し、それまで底層にあった貧酸素水塊(D0 2 mgL⁻¹未満)を持ち上げ、中層貧酸素水塊となる。この中層貧酸素水塊が、深度10 m以浅で行われている二枚貝養殖深度帯に冬季に到達するというシナリオである。

2017年1月の縦断面の水温、塩分、D0の分布(Fig. 2-3)は、このシナリオの水塊構造の元となる図である。湾口水路の下層から、低温・高塩分(高密度)で高D0の湾外水が湾口から湾奥底層に向かって伸びている。2012年2月の分布(Fig. 2-5)は2017年1月の結果と同様、あるいは、湾外水の底層進入がさらに進んだ状態であると考えられる。中層貧酸素水塊の水温は、水塊を囲む表層水や底層水、湾口水よりも高温であり、このことは、中層貧酸素水塊が、もともと湾内にあった海水であることを示している。Fig. 2-7は縦断面を模式化しているが、横断面でも、深度8 m付近(St. A3, B2, B3など)が低酸素化(D0 2-4 mgL⁻¹)しており、縦断面と同様な中層低酸素化が、湾央と陸岸との間で起きていることを示している。

湾口水路では、上層と下層に明瞭に分かれており、下層水は上層水よりも高温・高塩分である。その水温差は8.8℃、塩分差は21.0であり、密度差は14.5 kg m⁻³に及び、強く成層している。エスチュアリー循環流を考えると、

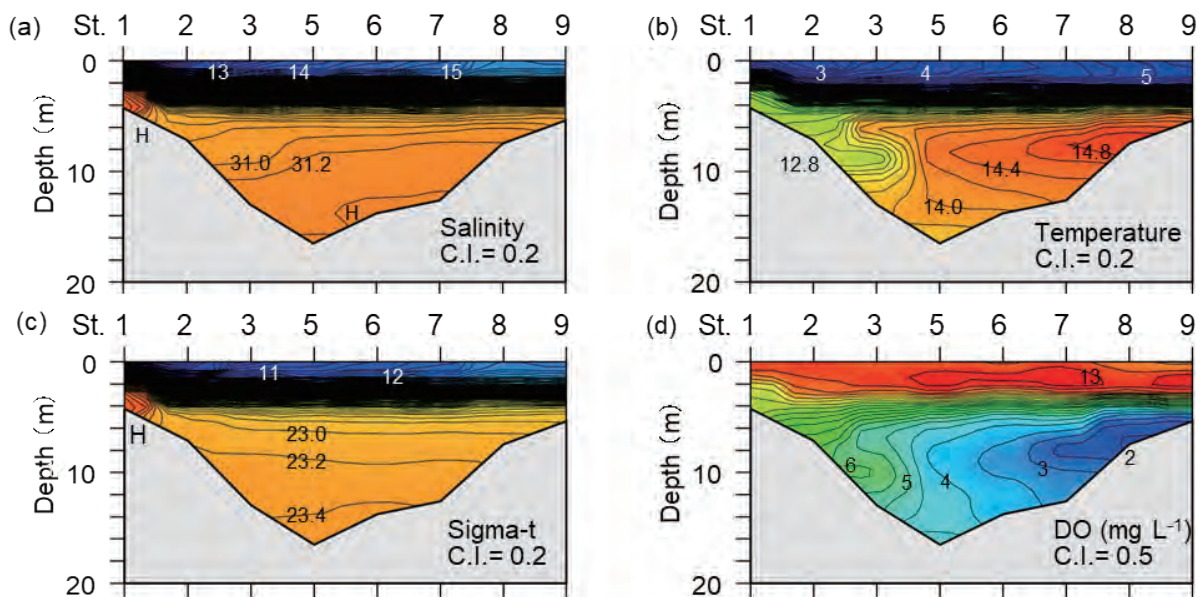


Fig. 2-3 Longitudinal distributions of (a) salinity, (b) temperature (°C), (c) sigma-t (kg m⁻³) and (d) DO (mg L⁻¹) measured in 26 January 2017. C.I. indicates contour interval.

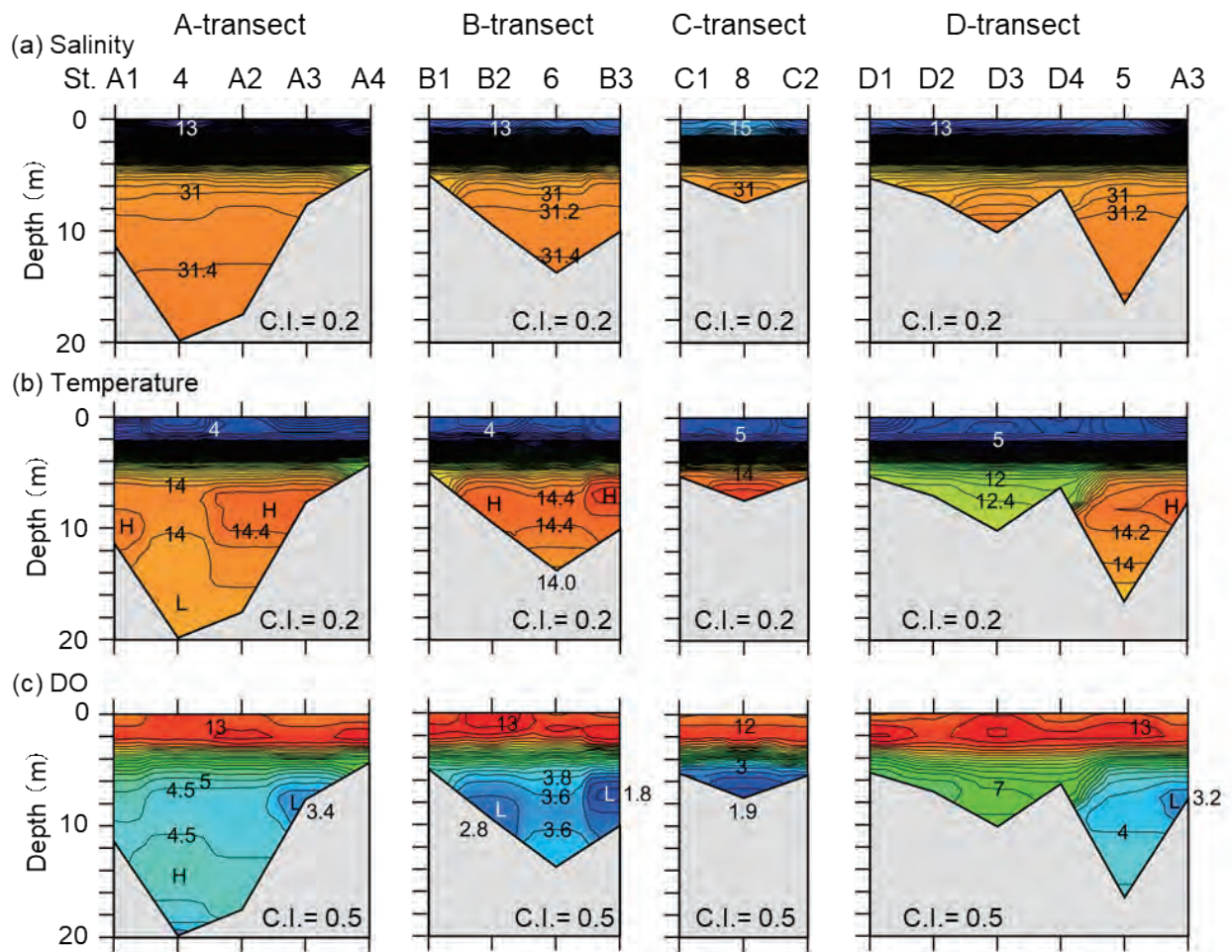


Fig. 2-4 Cross sectional distributions of (a) salinity, (b) temperature(°C) and (c) DO (mg L-1) along A-, B-, C- and D-transects, 26 January 2017. C.I. indicates contour interval.

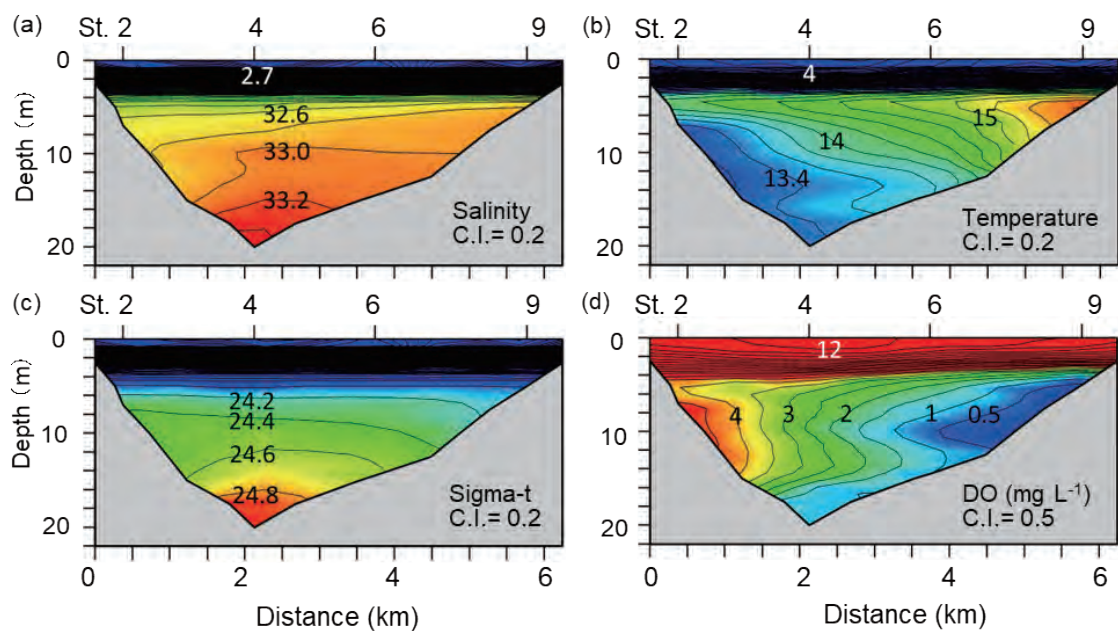


Fig. 2-5 Longitudinal distributions of (a) salinity, (b) temperature(°C), (c) sigma-t (kg m-3) and (d) DO (mg L-1) measured in 7 February 2012. C.I. indicates contour interval.

湾内水は上層から流出し、湾外水は下層を通過して進入していると考えられる。湾内に進入した湾外水は、湾内の等密度層に密度流として進入することとなる（有田ほか, 1998; 柏井, 1989）。

一方、夏季には、中層の貧酸素化は発生しないと考えられる。柏井（1989）によれば、湾外水の進入深度の下限は4月に最深部水深20 mに達するが、次第に上昇し、6月には6-7 mになり、その後、きわめてゆっくりと下降し、再び10 mを超えるのは9月末になってからである。このことから、夏季において、湾外水は深度約10 m以深には進入せず、それよりも下層は貧酸素化が進む。この状況は前述の2011年8月2日の観測結果と一致する。この期間中、湾外水が貧酸素水塊上端よりも深部に進入することはないため、中層の貧酸素化は起こらない。

2.5. まとめ

冬季の養殖二枚貝の大量死の原因を探るため、湾全体を網羅する詳細な鉛直観測を実施し、湾内における冬季の貧酸素水塊の空間分布を明らかにした。その結果、貧酸素水塊は湾全体の中層に位置し、二枚貝養殖場に到達していることを示した。

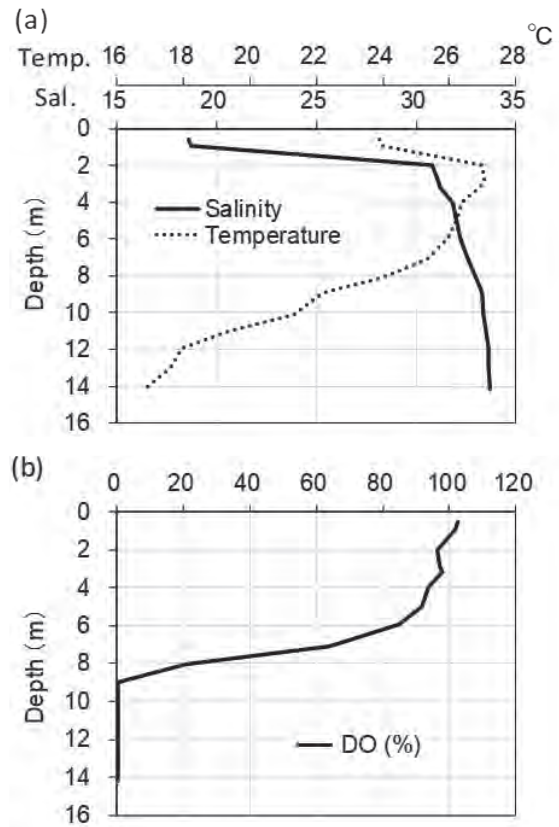


Fig. 2-6 Vertical profiles of (a) salinity and temperature(°C), and (b) DO-saturation (%) measured at St. 4 in 2 August 2011.

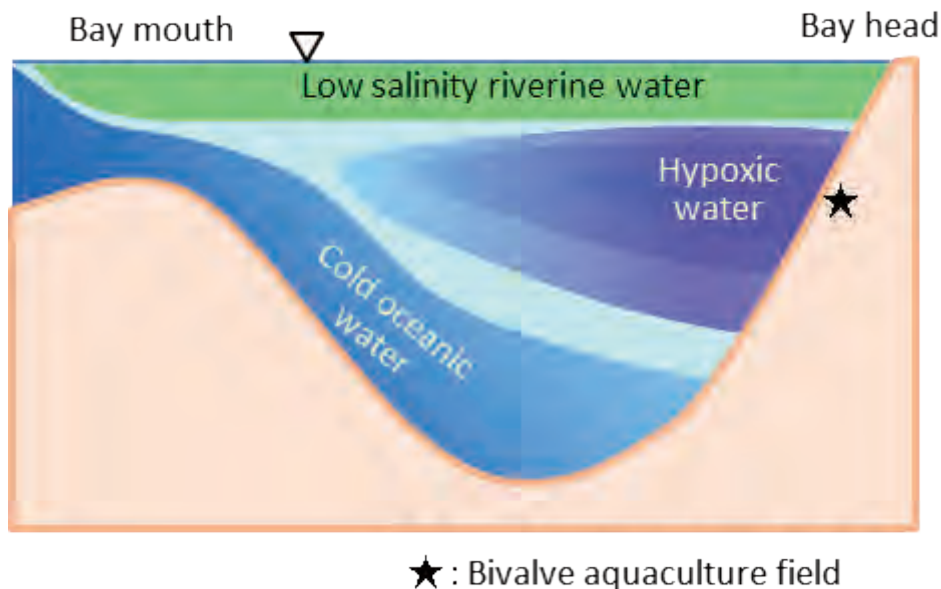


Fig. 2-7 Schematic view indicating generation of subsurface hypoxic water mass in winter.

第3章 被害防止に向けた貧酸素水塊の季節的な消長機構の解明

3.1. 背景と目的

一般的に、琵琶湖などを含む淡水の亜熱帯湖では、貧酸素水塊は成層が強くなる夏季に底層で発生し、冬季には表層が冷却されて密度が大きくなることによる鉛直混合によって解消することがよく知られている(藤原, 2014a)。また、汽水湖では、風や洪水によって貧酸素が改善する例もある(中村ほか, 1999; 森脇・大北, 2003; 杉原・新目, 2018; 瀬戸ほか, 2004 など)。

一方、汽水湖である久美浜湾の二枚貝養殖漁場において、冬季に、貧酸素水塊が養殖場や二枚貝の生息する浅海域にまで到達し、被害が発生すると考えられることを第2章で示した。しかし、貧酸素水塊が浅海域へと上昇する時期や、その前後の挙動については未解明である。

第3章では、久美浜湾において、秋季から翌春にかけて縦断鉛直観測を実施し、汽水湖における貧酸素水塊の解消機構について、日本海側の気候的な特徴を踏まえて明らかにした。貧酸素水塊の季節的な解消過程の解明は、漁業被害を防止するための基礎的な知見として不可欠であり、環境指標の一つである底層の溶存酸素濃度(DO)の季節変動を解釈する上でも重要な意味を持つ。

3.2. 材料と方法

3.2.1. 縦断鉛直観測

久美浜湾において、2021年11月から2022年4月にかけて、毎月下旬に縦断鉛直観測を実施した。観測は、湾口から湾奥の川上谷川河口にかけての縦断線上の11点で実施した(Fig. 3-1(b))。観測には、CTD(AquaTROLL, In-Situ社製、およびAAQ1183, JFEアドバンテック社製)を用い、水温、塩分、DOの鉛直分布を測定し、密度(以下、本文中ではすべてSigma-t (kgm^{-3})を表す)を水温および塩分から算出した。

3.2.2. 定点自動鉛直観測

自動観測装置(環境システム社製、センサー部はOTTHydromet GmbH社製のDataSonde5)をSt. 2とSt. 3の間に位置するトリガイ養殖筏に設置し(Fig. 3-1(b))、1時間ないし3時間に1度の頻度(ソーラー発電による充電状況等により変動)で水温、塩分、DOの鉛直観測を実施し、密度を水温および塩分から算出した。自動観測点の水深は約10.5 mで、観測は深度10 mまで実施した。2021年の秋季から2022年の春季にかけての観測において長期間の欠測があったため、本研究では、欠測が少なかった2020年9月11日から2021年4月27日のデータを使用した。

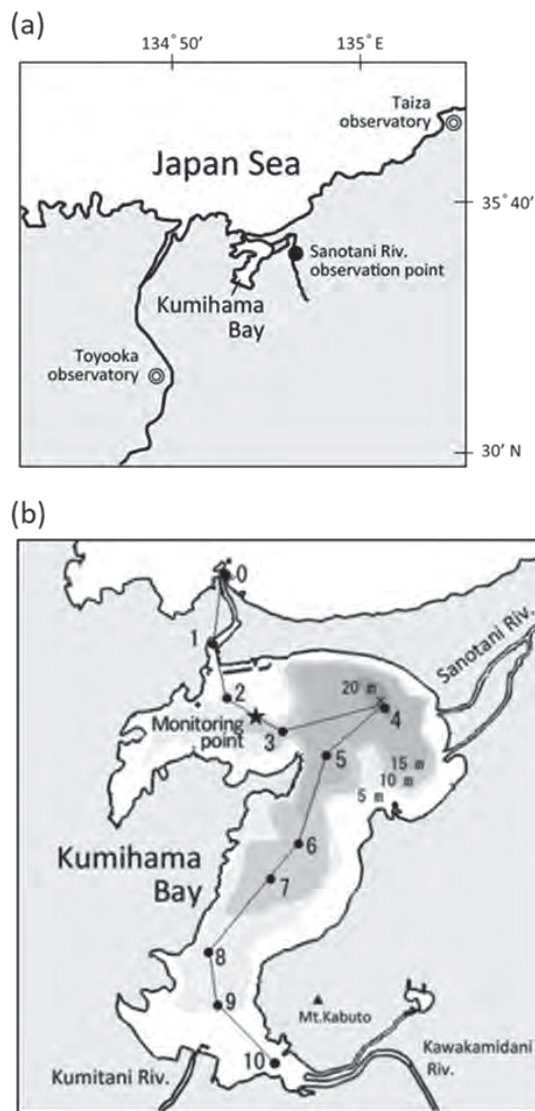


Fig. 3-1 Maps of study area with the water depth (color gradation). (a) Weather observation stations (double circles) and river flow observation point (solid circle). (b) Our observation stations. Circles, star and line show the hydro-cast stations, continuous monitoring point and the longitudinal transect, respectively.

3.2.3. 気象および河川流量

気象データとして、使用した自動観測データの期間と同時期にあたる、2020年10月1日から2021年4月30日における気象庁の豊岡特別地域気象観測所(Fig. 3-1(a))の日別の降水量、降雪量、最大積雪深を使用した。平年値は、同観測所の1991～2020年の平均値を使用した。また、風況データは間人観測所(Fig. 3-1(a))の2011年から2022年における冬季(11月から翌4月)の月最大風速を使用した。

流量データとして、佐濃谷川高橋橋(Fig. 3-1(a))における京都府公共用水域水質測定の結果を使用した。データは2020年10月7日、11月4日、12月2日、2021年1月13日、2月3日、3月10日、4月14日の計7回分を使用した。

3.2.4. 底層の溶存酸素濃度の季節変動

底層 D0 の季節変動データとして、京都府公共用水域水質測定久美浜湾奥部の定点 (Fig. 3-1(b) の St. 9 に該当) における 2012 から 2019 年度の下層の D0 の結果を使用した。下層は底から 1-2 m 上部と定義されており、必ずしも一定の深度ではない。湾奥以外の定点のデータは、下層の採水層が底層付近ではないため、使用しなかった。

3.2.5. 混合指数

風による混合の有無を調べるため、ウェダバーン数 W を使用した (Horne and Goldman, 1994; 環境省, 2014)。ウェダバーン数 W は以下の (1) 式で表され、値が大きいほど安定で、小さいほど混合しやすく、 $W=1$ が混合の有無の一つの目安とされる。

$$W = \frac{g' h^2}{u_*^2 L} \quad \dots(1)$$

g' : 修正重力加速度

h : 深さ (m)

u_* : 風速による摩擦速度

L : 吹送距離 (m)

修正重力加速度 g' については、以下の (2) 式から算出した。

$$g' = \{(\rho_1 - \rho_2) \rho_2^{-1}\} \times g \quad \dots(2)$$

ρ_1 : 上層水の密度

ρ_2 : 下層水の密度

g : 重力加速度

また、摩擦速度 u_* の 2 乗は以下の (3) 式を使用して算出し (有田ほか, 1998),

$$u_*^2 = \rho_a C_D U_z^2 \rho_1^{-1} \quad \dots(3)$$

ρ_a : 空気の密度 ($\approx 0.00118 \text{gcm}^{-3}$)

ρ_1 : 上層水の密度

U_z : 水面から z (m) の風速 (一般に $z=10$)

C_D : 抵抗係数

抵抗係数 C_D は以下の (4) 式を使用した (Deacon and Webb, 1964)。

$$C_D = (1 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3} \quad \dots(4)$$

3.3. 結果

3.3.1. 自動観測結果と気象および河川流量

2020 年 9 月から 2021 年 4 月における自動観測点の水温、塩分、密度の鉛直観測結果を時系列で示した (Fig. 3-2)。9 月下旬までは上層から下層まで 24°C 以上であったが、10 月から 11 月にかけて上層から下層まで徐々に水温が低下し、12 月には約 18°C まで低下した。12 月の中旬から 3 月の中旬ごろまで、表層 2m を、水温 $5\text{--}10^\circ\text{C}$ 、塩分 3-15、密度 2-15 の低温、低塩分、低密度の水塊が覆っていた。3 月下旬から 4 月にかけて、水温は上昇に転じ、表層の塩分および密度も徐々に上昇した。密度の結果で

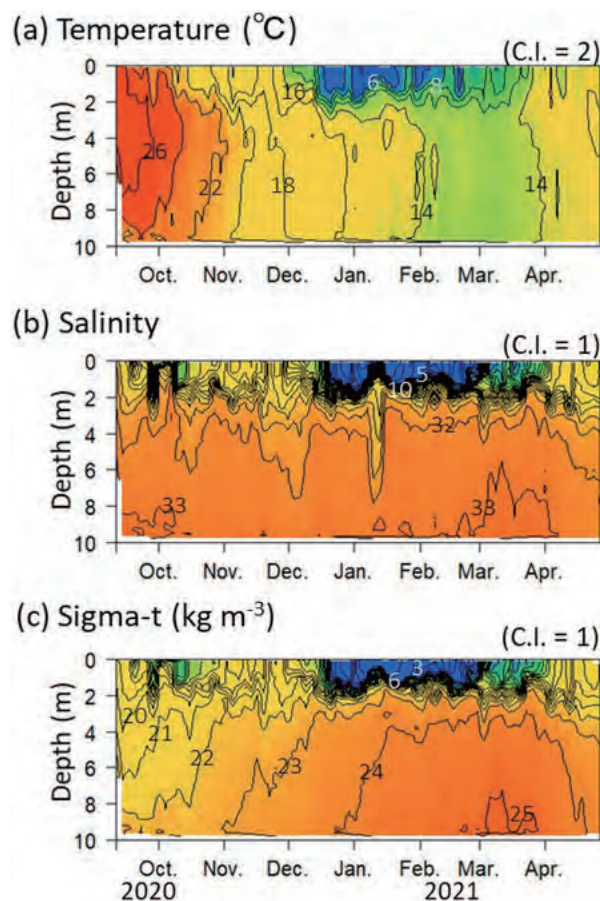


Fig. 3-2 Time series of vertical profiles of (a) temperature ($^\circ\text{C}$), (b) salinity and (c) sigma-t (kg m^{-3}) at the monitoring point shown by the star in Fig.1(b). C.I. indicates contour interval.

は、10 月から 11 月の秋季や 4 月の春季と比較し、12 月から 3 月にかけての冬季に強く成層していた。また、観測期間中に、表層から底層までの鉛直混合は一度もみられなかった。底層付近の塩分は概ね 32-33 であったが、2 月中旬から 3 月には 33 以上であった。下層の密度は 9 月から翌年 3 月にかけて徐々に上昇し、3 月に最大となった。

同期間の日別の降水量および降雪量と最深積雪を Fig. 3-3 に示した。降水量平年値をみると 11 月ごろから増加し、1 月に最大となり、その後、4 月末にかけて単調に減少する。観測期間中の降水量は日ごとに大きく変動があるが、概ね平年値と同様の変動であった。降雪は平年値と同じく 12 月中旬ごろに初めてみられ、2 月の中旬が最後であった。最大積雪の結果は、降雪とよく連動しており、まとまった降雪があった日に極大値をとっていた。顕著な極大値は期間中に 2020 年 12 月 17 日、2021 年 1 月 1 日、1 月 10 日、1 月 29 日、2 月 18 日の計 5 回あった。最深積雪は 12 月 29 日、1 月 17 日、2 月 2 日、2 月 21 日に 0 cm となっており、積雪が長くて 2 週間程度、

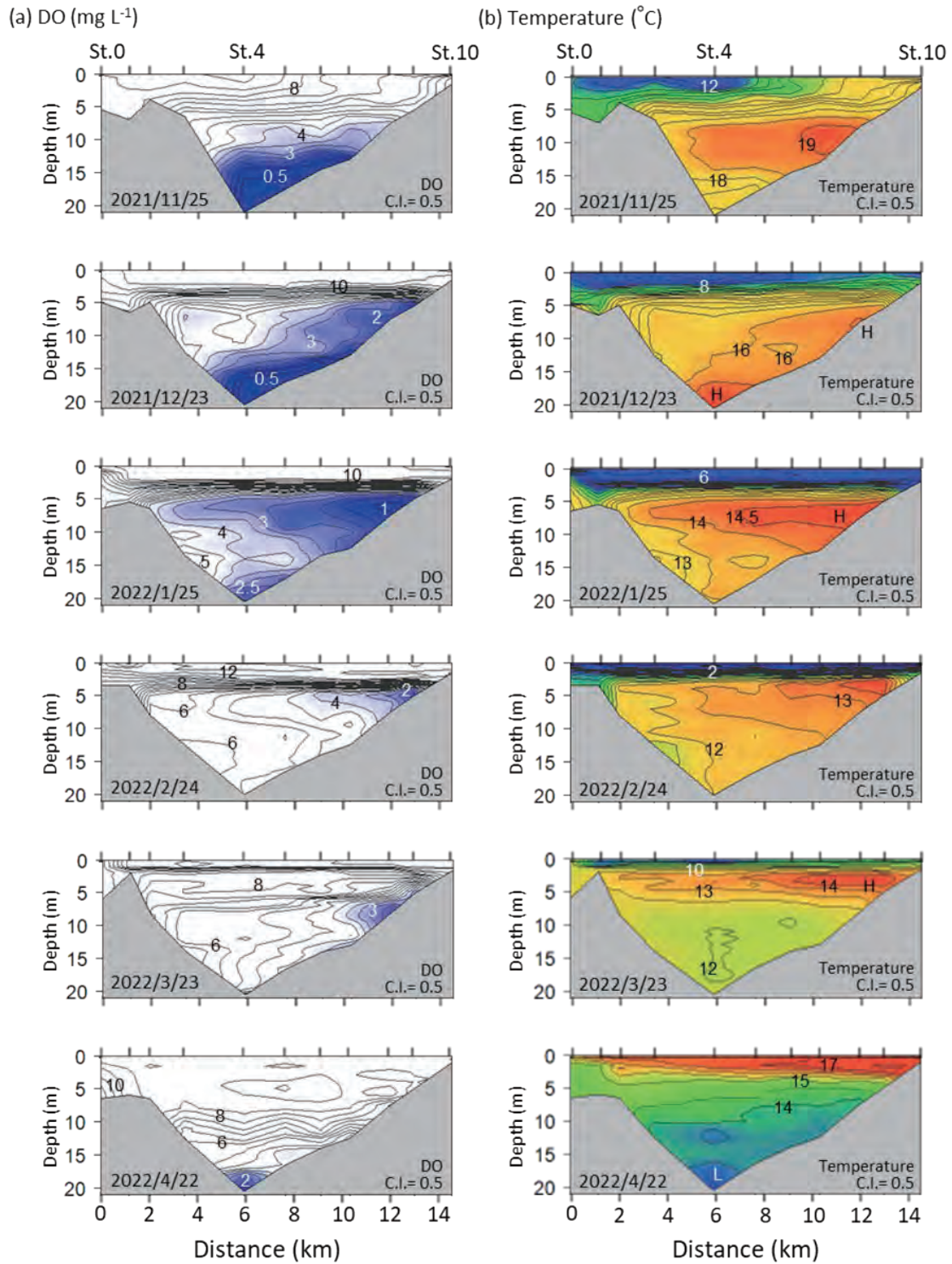


Fig. 3-3 (a) 30-year average daily precipitation (mm day⁻¹) and snowfall (cm day⁻¹) from October to April, and daily time series of (b) precipitation (mm day⁻¹), (c) snowfall (cm day⁻¹) and (d) snow depth (cm) from October 2020 to April 2021, at Toyooka city, Hyogo. Circles in Fig.3(d) indicate monthly data of Sanotani river flow (m³ s⁻¹).

短いと3日程度で融雪していることが示唆された。佐濃谷川の毎月の流量をみると、2月3日の3.93 m³s⁻¹が最も高く、次いで、3月10日の1.59 m³s⁻¹、1月13日の1.4 m³s⁻¹であった。

同期間(2020年11月から翌4月)の間人における月最大風速は13-22 ms⁻¹であった。また、2011年から2022年の冬季(11月から翌4月)における月最大風速は9-23 ms⁻¹であった。

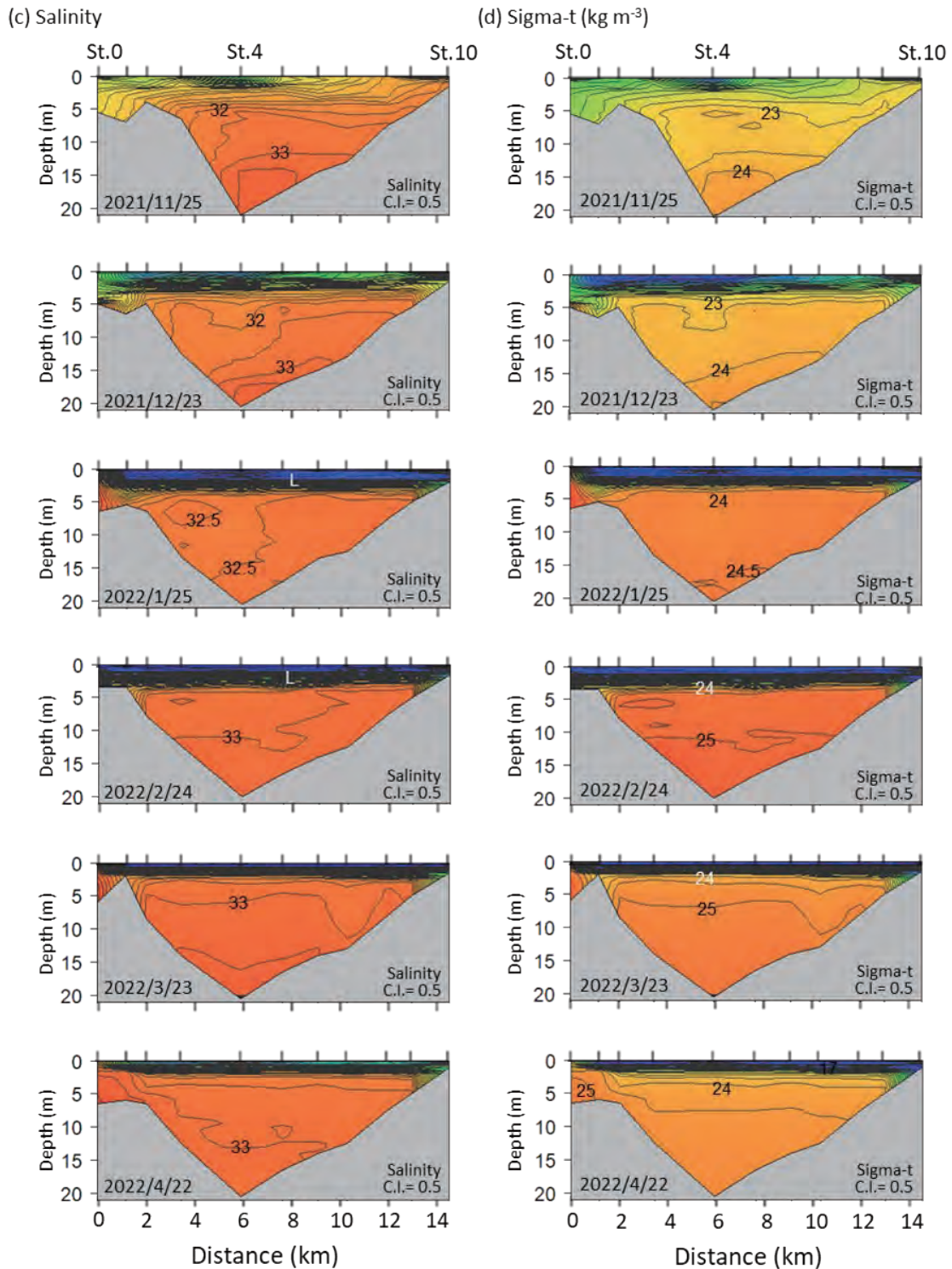


Fig. 3-4 Monthly longitudinal distributions of (a) DO (mg L⁻¹), (b) temperature (°C), (c) salinity and (d) sigma-t (kg m⁻³). C.I. indicates contour interval. (continued)

3.3.2. 縦断鉛直観測結果

3.3.2.1. 水温・塩分・密度

2021年11月から2022年4月の各月における水温、塩分、密度の鉛直縦断面の結果を Fig. 3-4 に示した。11月の湾内中層の水温は17-19°C、塩分は32-33と高かったのに対して、上層の水温と塩分は低く、特に、湾口部から

St. 4にかけての2 m以浅は水温12°C以下、塩分29以下であった。

12月は、湾全体の2 m以浅が水温8°C以下、塩分25以下、密度20以下と低温、低塩分、低密度で、強く成層していた。同様の低温、低塩分、低密度の水塊による成層は1月、2月、および3月にもみられた。この水塊

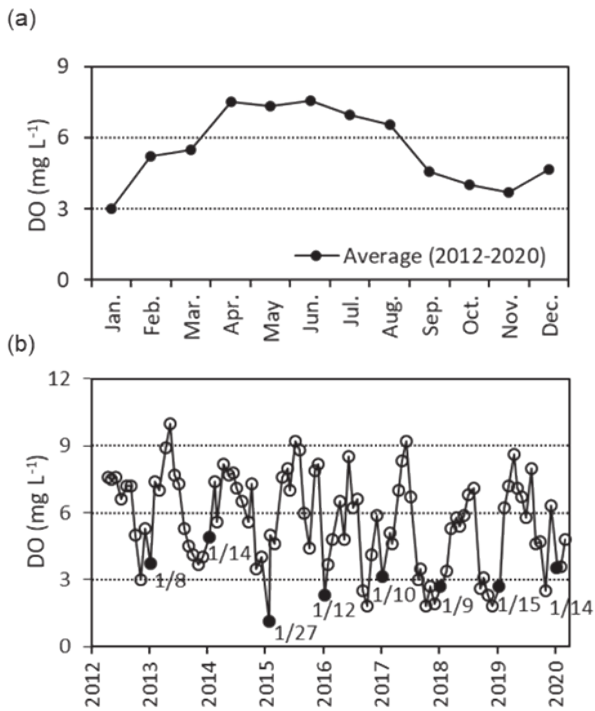


Fig. 3-5 (a) Monthly average DO (mg L⁻¹) and (b) monthly data of DO (mg L⁻¹) of lower layer at inner part of Kumihama bay (equivalent to St. 9). Solid circles and attached numbers in Fig. 5(b) indicate the data of each January and date of the observation.

の水温は、1月は6℃以下、2月は2-8℃、3月は8-13℃であり、塩分は、1月は16以下、2月は10-20、3月は10以下であった。

St. 8からSt. 9にかけての湾奥の水深6 m付近は、1月に水温が14℃台後半と湾内で最も高かった。2月および3月にも湾奥で高水温水塊がみられ、2月は水温が13-14℃、3月は12-14℃であった。

4月には、St. 4の18 m以深では、水温13.5℃以下の、周囲より低温の水塊がみられた。水深4 m以浅は、水温が15℃以上と3月の湾内水温よりも高かった。水深1 m以浅は、塩分20以下で、密度15以下の低密度の水塊が湾全体を覆っていた。

11月および12月の最深部の密度は24で大きな変化はなかったが、1月は24.5であった。3月に25以上で最も大きくなり、4月は再び25以下となった。

3.3.2.2. 溶存酸素濃度

2021年11月から2022年4月の各月におけるD0の鉛直断面の結果をFig. 3-4(a)に示した。11月の湾内には、湾中央部の水深約12 m以深に、D0が3 mgL⁻¹以下の貧酸素水塊が存在した。一方、10 m以浅の上層は湾全体で溶存酸素濃度が高かった。12月には、貧酸素水塊が湾中央部の水深約13 m以深に存在したほか、湾

奥部のSt. 6からSt. 9にかけての水深5-12 mの底層や中層にも存在した。

1月には、貧酸素水塊が湾中央部の底層直上2 m以内にも存在したほか、湾全体の水深4.5-13 mの中層に広く分布した。特に、D0が1 mgL⁻¹以下の無酸素に近い水塊がSt. 8からSt. 9にかけての水深6 m付近に存在した。2月および3月にも湾奥で貧酸素水塊がみられた。2月はSt. 8の中層およびSt. 9の底層にあたる水深4.5-5.5 mでD0が1-3 mgL⁻¹、3月はSt. 8およびSt. 9の底層付近でD0が2-3 mgL⁻¹であった。

4月には、貧酸素水塊は、湾奥ではみられなかったが、St. 4の18 m以深でみられた。湾全体の2 m以浅は12月から3月にかけて、D0が10 mgL⁻¹以上の高D0の水塊に覆われていた。

3.3.3. 湾奥底層における溶存酸素濃度の季節変動

京都府公共用水域水質測定 of 湾奥部定点における、底層D0の、2012年から2019年度の月別平均値をFig. 3-5(a)に示した。D0の平均値は1月に最小となり、そこから4月にかけて次第に上昇した。2012年から2019年度の毎月の結果をFig. 3-5(b)に示した。年ごとに、詳細な時期や値は異なるものの、すべての年で冬季にD0が極小となっていた。

3.3.4. 混合指数

風による混合の有無を考慮するため、ウェダバーン数 W が1となる風速を求めた。2021年11月から2022年3月にかけて最深部(St. 4)における上下層の密度差は常に10 kgm⁻³以上(最大は3月で20 kgm⁻³以上)であったため(Fig. 3-4(d))、密度差を10 kgm⁻³とし、吹送距離 L を久美浜湾での最大値である北東-南西方向の4,000 m、深さ h を湖の最深部の水深20 m、密度差を期間中の最小値である10 kgm⁻³として $W=1$ となる風速 Uz を算出したところ、約45 ms⁻¹であった。

3.4. 考察

3.4.1. 汽水湖における貧酸素水塊の解消過程

環境省が2014年に公表した資料によれば(環境省, 2014)、汽水湖は混合様式(混合のしやすさ)に応じて「部分循環湖」と「完全循環湖」に分け、現象の把握や対策を講じる必要があるとしている。「部分循環湖」は通年でほとんど混合しない汽水湖、「完全循環湖」は通年で1回以上混合する汽水湖と定義されており、前者は底層がほぼ通年で貧酸素化するのに対し、後者は風等により年1回以上、上下層が混合すると述べられている。本研究結果では、このどちらにもあたらない様式を示した。すなわち、久美浜湾では、通年で上下層が1度も鉛直混合しないにも関わらず、貧酸素水塊が季節的に完全に解消した。解消過程の模式図をFig. 3-6に示した。汽水湖では、湾外水が湖内の等密度層に進入してくること

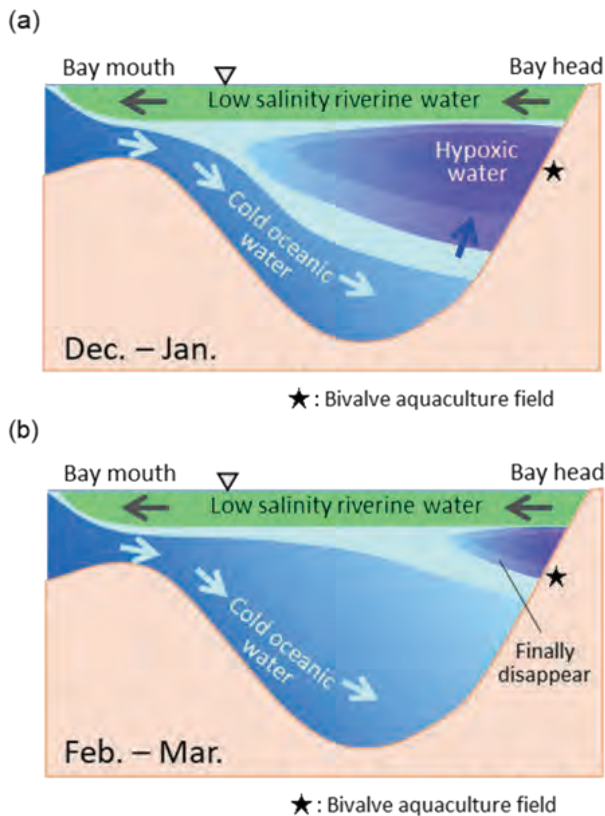


Fig. 3-6 Schematic view indicating (a) generation of subsurface hypoxic water mass in winter, and (b) breakdown process of the hypoxic water mass from winter to spring.

が知られている(有田ほか, 1998; 柏井, 1989)。湾外水の進入は, 1月に湖内の最深部に達し, 貧酸素水塊を大きく持ち上げる。上昇した貧酸素水塊は, 上層を覆う河川水由来の低密度水塊との大きな密度差により, それ以上は上昇せず, 低密度水塊の直下に位置した。その後, この貧酸素水塊の下部は, 潮汐周期によって断続的に底層に進入する湾外水の流動, 上部は表層を流れる河川水に連行(entrain)され, 1月から3月にかけて徐々にその体積を縮小し, 4月に解消した。Fig. 3-5に示した湾奥底層D0の複数年の結果は, この季節変動を裏付けるものである。St. 4(最深部)底層のD0は, 冬季に大きく改善したものの, 4月には再び 3 mgL^{-1} 以下となり, 以降の昇温期に, 下層で新たな貧酸素水塊が形成されていくと推察される。すなわち, 久美浜湾で, 夏季に下層で形成された貧酸素水塊は, 冬季に中層へと上昇し, 春季に完全に解消するが, 入れ替わりでほぼ同時期に最深部の底層で新たな貧酸素が発生し, 夏季にかけて下層で拡大していく季節変動を繰り返す可能性が高い。鉛直混合ではなく, 水平的な下層への酸素供給や, その過程で発生する中層貧酸素は, 東京湾(藤原ほか,

2000)や伊勢湾(藤原, 1999)などの内湾や, 港湾のくぼ地(藤井ほか, 2015)でも知られている。汽水湖でも, 同様の機構で, 季節的な貧酸素水塊の解消や, 中層貧酸素が発生することが明らかになった。

3.4.2. 冬季の鉛直混合を阻害する気候的特徴

一般的に, 温帯や亜熱帯に位置する亜熱帯湖では, 冬季は表層水が大気によって冷やされ, 密度が大きくなるため, 鉛直混合が起きやすい。淡水湖の琵琶湖(古川ほか, 2007; 藤原, 2014a)や池田湖(宮元ほか, 2016)では, 冬季に, 表層から水深100 m以上の湖底まで鉛直混合が起き, 下層に酸素が供給されることが知られている。太平洋側に位置する汽水湖の浜名湖も, 冬季に海底まで鉛直混合が起きる完全循環湖である(松田, 1999)。一方, 中緯度の日本海側に位置する汽水湖の久美浜湾では, 冬季に, 常に表層を低温・低塩分・低密度の水塊が覆っており, 表層からの鉛直混合が発生しない(Fig. 3-2)。北海道や本州の標高が高い一部の湖沼では, 表層の結氷により鉛直混合が阻害され, 貧酸素化が起きることが知られているが(知北ほか, 1997; 近藤・濱田, 2011; 杉原・中津川, 2013), 久美浜湾の場合は, 冬季の降水による淡水流入が鉛直混合を阻害する原因であると考えられた。本州の日本海側は季節風の影響で冬に降水が多いことが知られており(鈴木, 1962), さらに海岸沿いではそのほとんどが雪ではなく雨によってもたらされると言われている(小川・野上, 1994)。久美浜湾近傍の豊岡市でも同様の特徴を持ち, 日別降水量の平年値は11月上旬に極小となった後, 徐々に増加し, 1月中旬に年間最大となる(Fig. 3-3)。降水には降雨と降雪があり, 例年12月から3月にかけて降雪があることがわかる。降雨は直ちに河川を通じて久美浜湾に流入すると考えられる。2020年から2021年にかけての冬季にも, 1日あたり30 mmを超える降雨が12月の中旬から3月の中旬にかけて頻りに観測されており(Fig. 3-3), この時期は久美浜湾の表層を低温・低塩分の水塊が覆う時期と一致する(Fig. 3-2)。また, この期間中, 降雪は最大37 cmの積雪として一時的に陸上に蓄えられているが, いずれの積雪も, 数日から最長でも2週間以内に積雪が0 cmになり, 完全に融雪していることがわかる。これは, 春まで多くの積雪が残る東北地方および北海道や(朝岡ほか, 2007), 多くの河川で12月から翌2月に流量が最小となり, 春以降流量が増加する北陸地方と異なる(山中ほか, 2013)。この期間中の佐濃谷川の流量の計測結果を見ると, 1月から3月にかけて流量が多い。2月3日の極めて大きな流量は, 1月29日に最大28 cmあった積雪が, 観測日前日の2月2日に0 cmに減少したことを顕著に反映している。すなわち, この地域では, 降雪があり, 一時的に積雪となっても数日のうちに融解し, ただちに河川を通じて海域に流入する。冬季に降水量が多く, 気温が高い(気温が低い地域, す

なわち標高が高い地域を流域に含まない) ために、そのほとんどが春季まで積雪として蓄積されないという気候的特徴が、上層に強い塩分成層ができ、冬季の鉛直混合を阻害する要因であると考えられた。

この塩分成層は非常に強固であり、風によって破壊されて混合する可能性は極めて低い。ウェダバーン数は混合の有無の一つの目安とされ、例えば、宍道湖では、風速が 10 ms^{-1} 程度で W が 1 以下となり、混合が起きやすくなると言われている(環境省, 2014)。久美浜湾における 2021 年 11 月から 2022 年 3 月にかけて最深部(St. 4)における上下層の密度差が常に 10 kgm^{-3} 以上であることから(Fig. 3-4(d)), W が 1 以下となる最大風速は、風向に関わらず、最低でも 45 ms^{-1} 以上が必要である。過去 10 年間の、間人における冬季(11 月から翌 4 月)の月最大風速は $9\text{--}22 \text{ ms}^{-1}$ であり、風によって混合が起きる可能性は極めて低い。

3.5. まとめ

本研究では、冬季に、貧酸素水塊が久美浜湾の二枚貝養殖に被害を与えるという特異的な現象について、毎月、水温、塩分、D0 の縦断鉛直観測を実施し、観測結果から貧酸素水塊の空間的な季節変動解明を試みた。研究から得られた重要な結論を以下に示す。

(1) 久美浜湾では、秋季から冬季にかけて水温逆転が生じるものの鉛直混合は発生せず、夏季に下層に形成された貧酸素水塊が冬季にも残存していた。鉛直混合が発生しない理由として、冬季に、表層を、低塩分、低密度の水塊が覆っていることが考えられた。

(2) 海域が、冬季に降水量(降雪を含む)が多い日本海側の気候のうち、気温が比較的高い中緯度地域に位置し、さらに流入河川の流域の標高が高くないことにより、降雪後すぐに融雪するか、あるいはそもそも雪ではなく雨として降り、ただちに海域へ流入するという気候的特徴によって、冬季の表層低密度水塊が形成されると考えられた。

(3) 夏季から 11 月ごろまで底層に存在していた貧酸素水塊は、12 月から次第に湾外水の進入深度が深くなることにより、一部が中層へと持ち上げられる。1 月には、進入深度が底層へ達することから、底層の貧酸素水塊はほぼすべて中層へと持ち上げられ、表層水塊の下の等密度層に広がる。中層の貧酸素水塊は、下部は潮汐周期による湾外水の流動、上部は表層を流れる河川水に連行(entrain)され、1 月から 3 月にかけて徐々にその体積を縮小し、4 月に解消した。

(4) 貧酸素水塊が、1 月に、湾全域の中層に大きく広がることにより、この一部が養殖漁場近辺に到達することが明らかになった。

以上のように、貧酸素水塊が冬季にまで残存し、浅海域の二枚貝漁場まで到達するという知見は、汽水湖で漁業を実施するにあたって、極めて重要である。

また、冬季の大きな淡水流入が塩分成層を形成し、鉛直混合しないという知見は、環境指標として底層 D0 の長期的な変動を考える上で非常に重要である。長期的な淡水流入量の変化によって、混合様式が変化する(した)可能性があり、これは底層の D0 にも影響すると考えられる。立川ほか(2011)は、今後温暖化が進めば、山形県最上川の 4 月の流量が大きく減少し、1 月から 3 月の流量が大きく増加することをシミュレーションにより明らかにしている。同様の現象が各地で起こる可能性があり、気候変動による冬季の気温の変化だけでなく、淡水流入量の変化が下流域の混合様式に与える影響にも注目する必要がある。

第4章 餌料環境改善に向けたクロロフィルの時空間変動機構の解明

—貧酸素水塊および降水との関係性—

4.1. 背景と目的

京都府の久美浜湾は閉鎖性海域（汽水湖）であり、高い生産性を生かして二枚貝の垂下養殖が盛んに行われている。近年、これらの養殖二枚貝の成育不良（肥満度低下、小型化、成長の遅滞）が問題となっている。二枚貝の成育不良の原因は、餌料不足や高水温、貧酸素によるダメージなど、複合的であることが多い。中でも、二枚貝の栄養状態は、高水温耐性や貧酸素耐性に影響を与えられていると言われており（青山ほか, 1999; 松野・木村, 2002; 鈴木ほか, 2012）、餌料環境は極めて重要な要素である。現在、垂下養殖では、漁業者が季節ごとの環境に合わせ、養殖深度を経験的に微調整しており、その際には、餌料指標としてクロロフィル濃度も重要となる。

クロロフィルに関する研究は、これまでから実施されているが、その多くは養殖漁場やモニタリングポストにおける連続観測や（佐々木ほか, 2001; 金子ほか, 2019; 藤原ほか, 2024 など）、衛星を利用した表層クロロフィルの分布推定である（比嘉ほか, 2015 など）。前者は観測点が限られているため空間的な分布に言及されることが多く、後者は深度ごとのデータが取得できないため、鉛直的な分布が議論できない。

第4章では、久美浜湾における毎月の縦断鉛直観測結果および養殖漁場に設置した自動観測装置による連続観測結果から、クロロフィル極大層の季節変動と、短期的なクロロフィル分布の変動を明らかにした。季節的な変動については、第3章で明らかにした貧酸素水塊の挙動との位置関係を、短期的な変動については降水との関係を調べた。最後に、これらの変動を深度0.5-1 m間隔の微細な空間スケールで観察し、閉鎖性海域の高い一次生産が、現状では二枚貝養殖に十分に活用できていないことを示した。

4.2. 材料と方法

4.2.1. 縦断鉛直観測

久美浜湾の湾口から湾奥の川上谷川河口にかけての縦断線上の11点において、毎月下旬に縦断鉛直観測を実施した（Fig. 4-1）。観測には、CTD（AAQ171 および AAQ1183、いずれも JFE アドバンテック社製）を用い、水温、塩分、溶存酸素濃度（DO）、クロロフィル蛍光を測定した。密度は水温と塩分から算出して使用した。鉛直分布の季節変動をみるため、観測データのうち最深点の St. 4 におけるデータを、2022 年 4 月から 2024 年 4 月にかけての約 2 年分使用した。また、空間変動の季節変動をみるため、全測点の 2023 年 1 月から 12 月のデータを用いた。湾外水は湾口水路の底層を通じて湾内に入ると考えられるため（柏井, 1989; 有田ほか, 1998 年

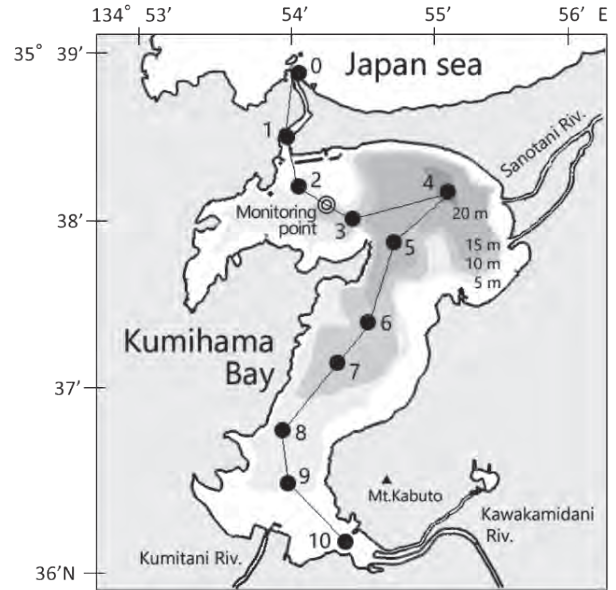


Fig. 4-1 Map of the study area with the water depth (color gradation) and our observation stations. Solid circles with numerals indicate the stations. Double circle indicates the automatic-monitoring point. Solid line represents longitudinal transect.

ど）、本章では、湾外に最も近い St. 0 の底層付近である深度 4 m のデータを湾外水の指標として扱った。ただし、2023 年 12 月については、St. 0 の深度 4 m の塩分が 27.6 と低く、湾外水の指標として適さないため、解析から除外した。

また、クロロフィル蛍光値は現場海水により測定した光合成色素濃度（クロロフィル a およびフェオ色素の合計）で較正し、クロロフィル濃度 (μgL^{-1}) として使用した。較正に使用した光合成色素濃度は、2022 年 7 月、2023 年 1 月および 8 月の計 3 回、観測と同時に海水を採水し、直径 25 mm の WhatmanGF/F フィルターを用いて濾過して 90%アセトン溶液で色素抽出したのち、蛍光光度計（Trilogy, TurnerDesigns 社製）により測定した（Holm-Hansen et al., 1965）。なお、DO 飽和度が 40% 以下になるとトリガイの生存に影響を及ぼすことから（野上ほか, 1981）、本章では DO 飽和度 40% 以下を貧酸素とした。また、二枚貝の餌料として利用できない貧酸素水塊中のクロロフィル濃度を議論の対象外とした。

4.2.2. 栄養塩濃度測定

貧酸素水塊形成時の鉛直的な栄養塩濃度分布を確認するため、最深点である St. 4 において鉛直的な採水調査を実施した。栄養塩は、2022 年 7 月 20 日に、St. 4 の深度 0 m から 20 m まで 2 m おきに計 11 層採水し、ろ過した海水中の栄養塩を JISK0126 による連続流れ分析法で測定した。分析には QuAAtro39（ビーエルテック

社製)を使用した。分析項目はアンモニア態窒素(NH₄-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、およびリン酸態リン(PO₄-P)である。

4.2.3. クロロフィル連続自動鉛直観測

夏季のクロロフィル増大と降水との関係を見るため、自動観測装置(環境システム社製、センサー部はOTTHydromet GmbH社製のDataSonde5)をSt. 2とSt. 3の間に位置するトリガイ養殖筏に1台設置し(Fig. 4-1)、概ね1時間に1回の頻度で水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル蛍光の鉛直観測を実施した。密度は水温と塩分から算出して使用した。本装置は、一定の時間間隔で、多項目水質計を約1 cm s⁻¹の速度で鉛直的に自動昇降させてデータを取得するものである。本装置により測定したクロロフィル蛍光値は現場海水による較正を実施していないため、相対値として使用した。自動観測点の水深は約10.5 mであり、観測は表層から深度約8 mまで実施した。クロロフィル蛍光値は、1日ごとに平均し、深度0-2 m、二枚貝の養殖深度にあたる深度2-4 m、および深度4-8 mに分けて解析した。解析に用いたデータは夏季に最も欠測が少なかった2018年6月1日から11月30日のものである。

4.2.4. 気象データ

久美浜湾周辺の降水量として、気象庁の豊岡特別地域気象観測所(兵庫県)のデータを用いた(<https://www.data.jma.go.jp/risk/obsd1/index.php>, 2024年7月9日)。豊岡観測所は、久美浜湾の南西約10 kmにあり、最も近い気象観測所である。

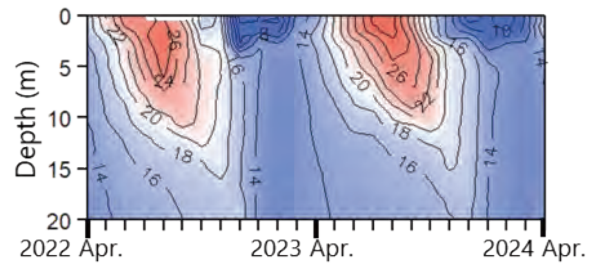
4.3. 結果

4.3.1. 水温・塩分・密度の季節変動および貧酸素水塊の消長

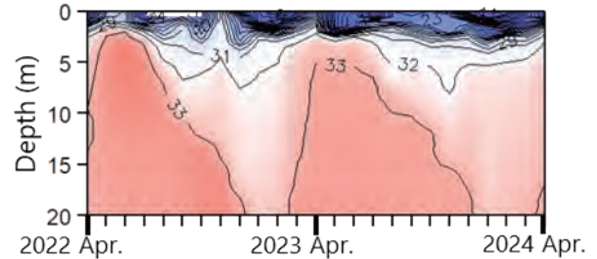
最深点である湾中央のSt. 4における水温、塩分、密度の鉛直分布の季節変動をFig. 4-2(a), 4-2(b), 4-2(c)に示した。水温、塩分、密度の分布にはいずれも明確な季節変動がみられた。水温は、4月以降に表層から上昇し始め、8月ごろに最大となったのち、下降に転じた。深度5 m以深の塩分は5月ごろに最大となった後、徐々に低下し、1月から2月にかけて最小となった。一方、深度2 m以浅は常に塩分30以下の低塩分水であった。深度2 m以浅の密度は塩分の分布とよく一致していた。底層付近の深度20 mの密度は、4月に最大となり、12月に最小となった。表層から底層まで密度が一樣となるような鉛直混合は、観測期間中一度も確認されなかった。

それぞれの観測月における湾内の密度鉛直分布のうち、湾外水の密度と等密度となる深度を進入深度とし、Fig. 4-2(c)中に黒点で示した。なお、湾外水の密度が湾内底層の密度よりも重い場合は、進入深度を20 mとした。ここで進入深度は、湾外水が湾内に進入する際の

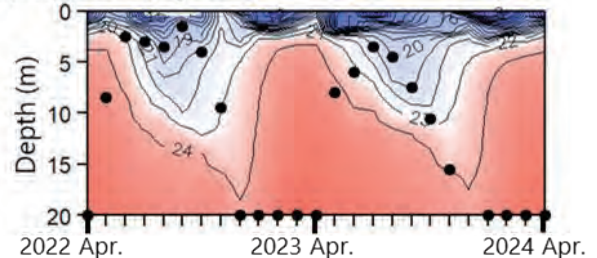
(a) Temperature (°C)



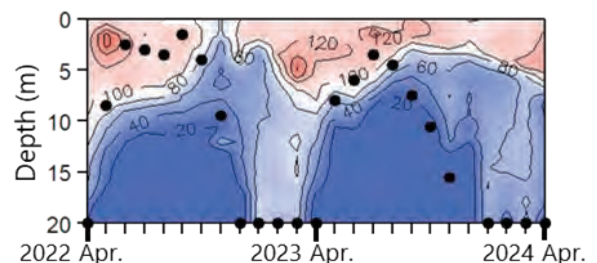
(b) Salinity



(c) Sigma-t (kg m⁻³)



(d) DO saturation (%)



(e) Chlorophyll concentration (μg L⁻¹)

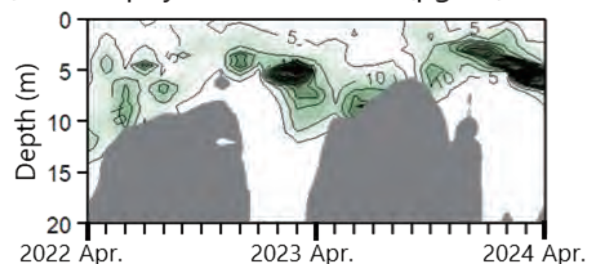
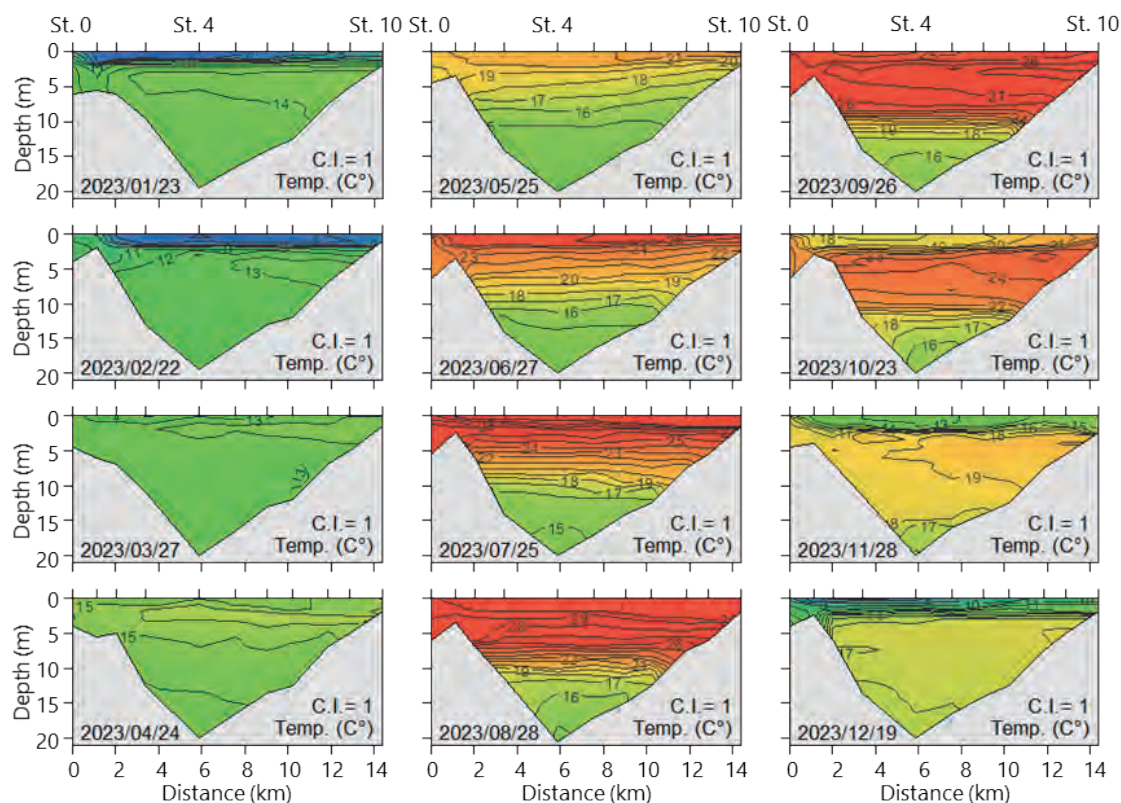


Fig. 4-2 Seasonal variations in vertical distribution of (a) temperature (°C), (b) salinity, (c) sigma-t (kg m⁻³), (d) dissolved oxygen saturation (DO) (%), and chlorophyll concentration (μg L⁻¹) at the deepest point of the bay (St. 4) from April 2022 to April 2024. The black closed circles in Fig. 4-2(c) and 4-2(d) indicate the depth at which the density is equal to that of the bottom layer at the bay mouth. The grey area in Fig. 4-2(e) shows the distribution of hypoxic water mass (DO < 40%).

(a) Temperature (°C)



(b) Salinity

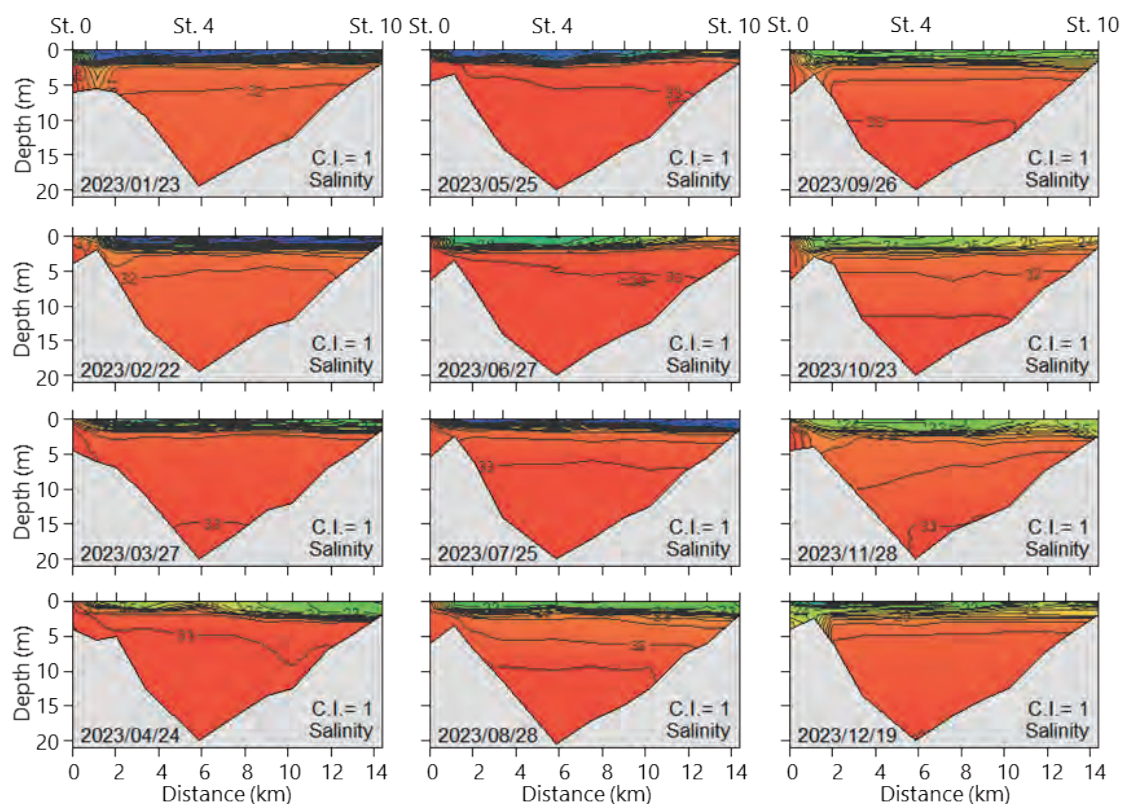
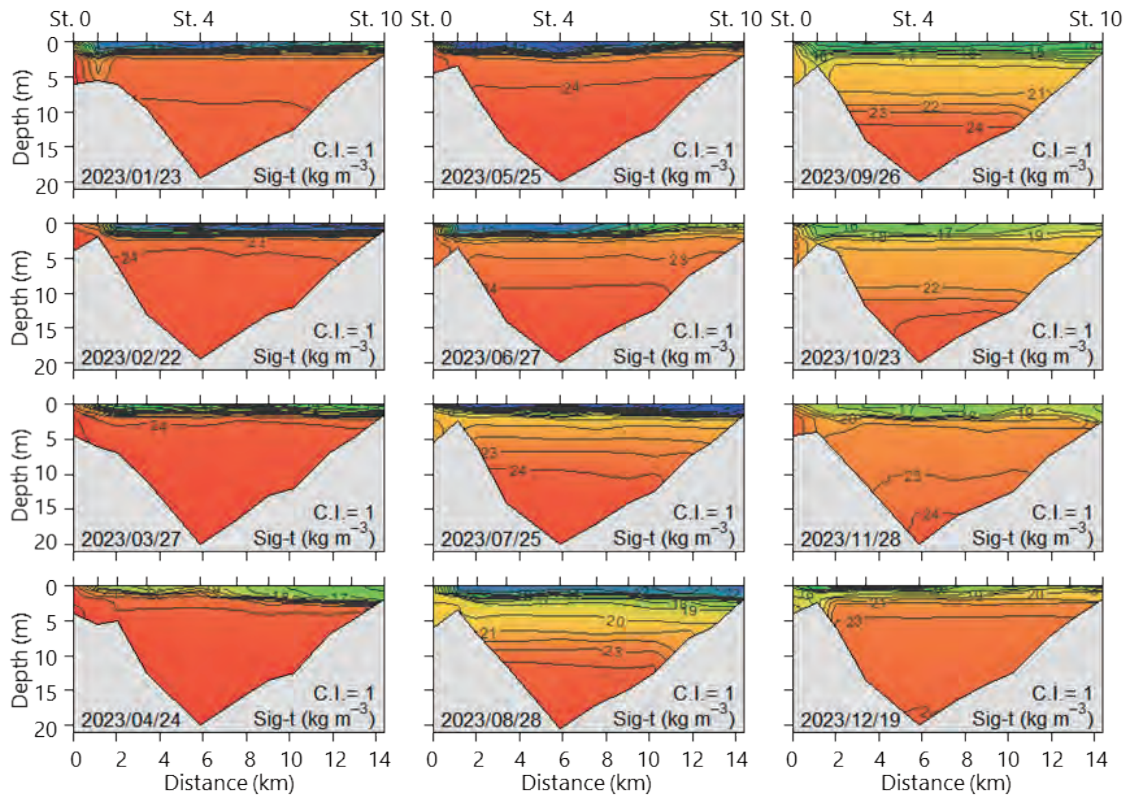


Fig. 4-3 Monthly longitudinal distributions of (a) temperature (°C), (b) salinity, (c) sigma-t (kg m⁻³), (d) dissolved oxygen saturation (DO) (%), and chlorophyll concentration (µg L⁻¹) in 2023. “C.I.” indicates contour interval. The grey area in Fig. 4-3(e) shows the distribution of hypoxic water mass (DO < 40%), and dotted line indicates the monitoring point located in aquaculture field. (continued)

(c) Sigma-t (kg m^{-3})



(d) DO saturation (%)

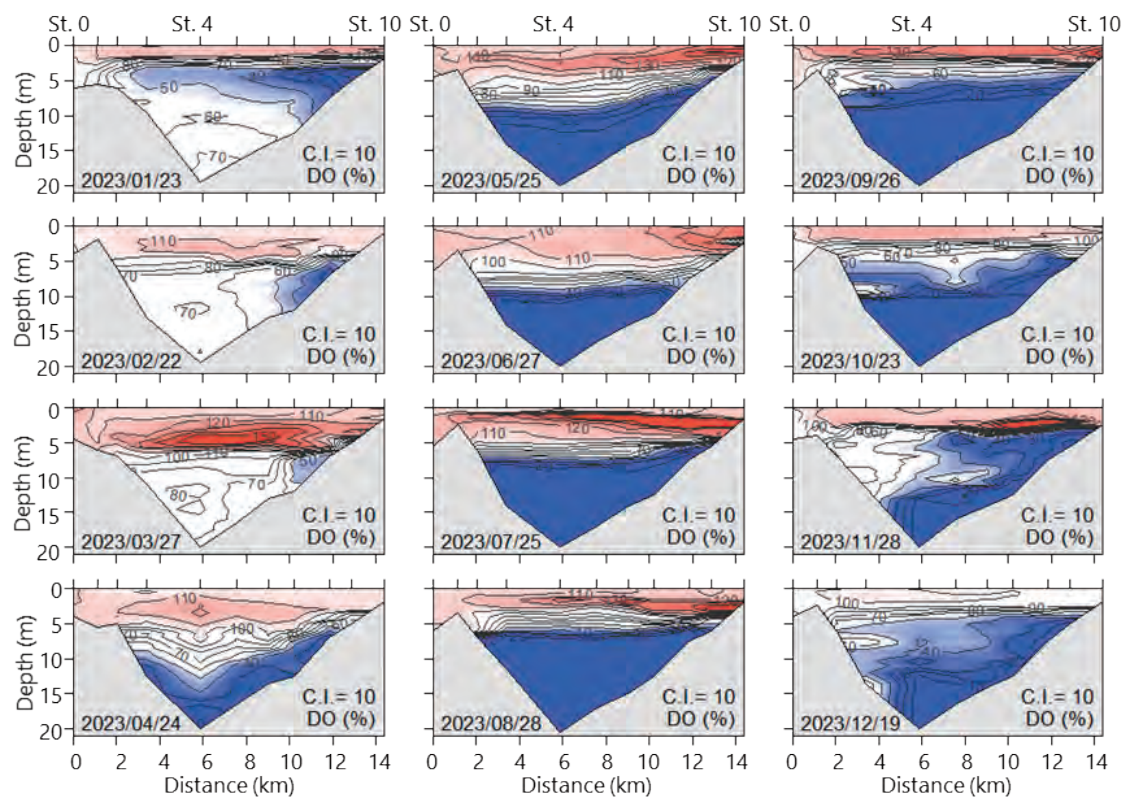


Fig. 4-3 Monthly longitudinal distributions of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity, (c) sigma-t (kg m^{-3}), (d) dissolved oxygen saturation (DO) (%), and chlorophyll concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) in 2023. “C.I.” indicates contour interval. The grey area in Fig. 4-3(e) shows the distribution of hypoxic water mass (DO < 40%), and dotted line indicates the monitoring point located in aquaculture field. (continued)

最大深度である。進入深度には明確な季節変動がみられた。4月から6月ないし7月にかけて、進入深度は底層から深度5 m付近まで上昇し、9月ないし10月ごろからまで5 m深が継続した後、12月にかけて深度20 mへと下降した。おおよそ12月から4月にかけて、進入深度は常に底層の深度20 mであった。

湾央のSt. 4におけるD0飽和度の鉛直分布の季節変動をFig. 4-2(d)に示した。また、図中にFig. 4-2(c)中と同じ進入深度を黒点で示した。D0飽和度が40%以下の貧酸素水塊の分布深度の変動は、進入深度の変動と概ね一致した。湾央における貧酸素水塊は、進入深度が底層となる1月に解消し、3月までみられなかった。その後、4月から6月にかけて進入深度が上昇するとともに、貧酸素水塊の分布深度は15 m以深から10 m付近の浅い方へと拡大し、11月ごろまで深度10 m以深が貧酸素であった。

次に、水温、塩分、密度の空間分布の季節変動をFig. 4-3(a), (b), (c)に示した。水平的な値の差は小さく、湾口付近のSt. 0およびSt. 1を除いて、湾全体が概ね層状の構造をしていた。そのため、湾全体の分布の季節変動は、St. 4における季節変動(Fig. 4-2(a), (b), (c))に代表されると考えられた。1月、2月、11月および12月には、湾口部を除く湾全域の深度2 m以浅の表層と、2 m以深の下層の水温、塩分、密度の状況は異なった。表層は下層に比べて水温、塩分、密度はいずれも低かった。5月から10月にかけて、水平的な水温差に対して鉛直的な差が極めて大きく、8月には表層が30℃以上であるのに対して、下層は15℃以下であった。5月から10月にかけての深度2 m以浅の表層の塩分は30以下、密度は20以下であった。冷却期である11月および12月は、St. 5よりも湾奥側の深度5 m付近に、周囲よりも水温低下が遅れた高水温水塊が残在した。この高水温水塊は、1月および2月にもみられた。

D0飽和度の空間分布の季節変動をFig. 4-3(d)に示した。D0飽和度の分布は4月から9月まで層状であり、水平的な値の変動は小さかった。そのため、同時期における湾全体のD0飽和度の鉛直的な季節変動は、St. 4におけるD0飽和度の鉛直的な季節変動(Fig. 4-2d)と同様の変動であった。しかし、1月から3月まで、および10月から12月までは、前述した残存する高水温水塊に対応し、D0飽和度には水平的な差異が認められた。具体的には、1月および2月に貧酸素水塊は湾奥に存在し、3月には貧酸素水塊は解消したものの、D0飽和度が40-50%の低D0水塊が湾奥に存在した。湾奥の貧酸素水塊の上端の深度は1月に約3 m、2月には約5 mであり、3月のD0飽和度が40-50%の水塊の上端の深度は約8 mであった。10月には、深度10 m付近で、St. 3やSt. 5付近のようにD0飽和度が局所的に高い部分が見られた。11月および12月にはSt. 5よりも湾奥側の深度5-10 mに貧酸素水塊が存在し、St. 4よりも湾

口側の深度10 m以浅では湾奥側よりもD0飽和度が高かった。

4.3.2. クロロフィル鉛直分布の季節変動

湾央のSt. 4におけるクロロフィル濃度の鉛直分布の季節変動をFig. 4-2(e)に示し、図中にFig. 4-2(d)を元にした貧酸素水塊の分布を灰色で重ねて示した。クロロフィル濃度の極大層の深度は、年による差はあるものの、4月から5月ごろに深度6-10 mと年間で最も深く、11月から12月ごろにかけて深度5 m以浅と最も浅くなり、その後、1月から4月にかけて再び深くなる大まかな季節変動を示した。

クロロフィル濃度は、2023年および2024年ともに、3月の深度約5 mにおいて年間で最大となり、2023年3月には最大値が85 μgL^{-1} 、2024年3月には最大値が130 μgL^{-1} であった。湾央におけるクロロフィル濃度の最大値が20 μgL^{-1} 以上となるのは概ね12月から4月にかけてであり、それ以外の期間にはクロロフィル濃度はほぼ20 μgL^{-1} 以下であった。

4.3.3. 貧酸素水塊とクロロフィル空間分布の位置関係

貧酸素水塊の分布とクロロフィルの分布には関係性がみられた。Fig. 2eに示した湾央のSt. 4におけるクロロフィルの鉛直分布と、重ねて示した貧酸素水塊の分布の結果では、4月から、11月あるいは12月ごろにかけて貧酸素水塊の上端の深度が15 m以深から深度5-7 m付近まで上昇するにつれ、クロロフィル分布の深度も上昇した。St. 4における貧酸素水塊が解消する1月以降、貧酸素水塊が再び形成される4月から5月ごろまでの間、クロロフィル分布の深度は、2023年は深度4 mから9 mへ、2024年は深度3 mから7 mへとそれぞれ徐々に低下した。

クロロフィル空間分布の季節変動をFig. 4-3(e)に示し、図中にFig. 4-3(d)を元に貧酸素水塊の分布を灰色で重ねて示した。クロロフィルは一年を通して概ね層状に分布しており、季節によって異なる深度に極大層を形成していた。クロロフィル極大層の深度の大まかな季節変動は前項で述べたSt. 4における鉛直分布の季節変動と同様であったが、本項では季節的な空間分布の詳細と貧酸素水塊との位置関係の詳細を述べる。

1月および2月には、湾奥に貧酸素水塊が存在しており、貧酸素水塊の上端の深度は、クロロフィル極大層の下端の深度とほぼ一致した。1月から3月にかけて、クロロフィル極大層の深度は0-4 mから4-10 mへと徐々に深くなり、クロロフィル濃度の最大値は10 μgL^{-1} から80 μgL^{-1} まで上昇した。クロロフィル濃度は3月にSt. 6の深度約6 mにおいて年間で最大となる98 μgL^{-1} であったが、3月から5月にかけて徐々に低下し、5月には湾全体の大部分で5-10 μgL^{-1} であった。

6月から8月にかけて、貧酸素水塊の直上にクロロフィ

ル極大層がみられた。一方、養殖漁場付近を含む湾全体の深度4 m以浅のクロロフィル濃度は、St. 8よりも湾奥の河口付近を除いて、概ね5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以下であった。

9月には、貧酸素水塊直上のクロロフィル極大は確認されず、深度5 m以浅のクロロフィル濃度が湾全体で5-10 $\mu\text{g L}^{-1}$ 程度であった。10月になり深度5-10 mで貧酸素水塊の分布に水平的な差異がみられた。それと同時に貧酸素水塊直上の深度5 m付近にクロロフィル濃度が15-20 $\mu\text{g L}^{-1}$ の極大層が確認された。11月には、St. 4よりも湾奥側の深度4 m以深に存在する貧酸素水塊の直上に、クロロフィル濃度が最大68 $\mu\text{g L}^{-1}$ の極大層がみられた。12月にも11月と同様、St. 4から湾奥にかけての深度4 m以深に貧酸素水塊が存在し、その直上にクロロフィル濃度が最大32 $\mu\text{g L}^{-1}$ の極大層がみられたが、11月とは異なり、この極大層は湾全体に拡大した。

4.3.4. 短期的なクロロフィル変動と降水との関係

複数年にわたるクロロフィルの連続観測の結果、6月から11月の夏季から秋季にかけて、降水と表層のクロロフィル蛍光に関係がみられた。代表的な2018年について、層別のクロロフィル蛍光値の日別値および降水量をFig. 4-4に示した。

深度0-2 mの表層におけるクロロフィル蛍光の日平均値が25 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超えるピークは、7月13日、9月6日、9月14日、10月7日の4度みられ、それぞれの直前10日以内に50 mmday^{-1} 以上のまとまった降水がみられた。降水のピークはそれぞれ、7月6日、9月4日、9月9日、9月30日であり、クロロフィル蛍光のピークは降水のピークの2-7日後であった。

深度2-4 mにおけるクロロフィル蛍光値は、降水の多寡に関わらず、25 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以上になることはなかった。7月のまとまった降水の際、深度2-4 mのクロロフィル蛍光値に顕著な増加はみられなかったが、9月および10月の降水の際には、深度0-2 mの層と同様に一時的にクロロフィル蛍光値が増加し、最大値は22 $\mu\text{g L}^{-1}$ であった。

4.3.5. 夏季における栄養塩の鉛直分布

2022年7月20日のSt. 4における栄養塩の鉛直分布をFig. 4-5に示した。深度10 m以深は貧酸素であり、貧酸素中では $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の値が高く、底層に向かうほど濃度は増加した。底層直上の深度20 mにおいて $\text{NH}_4\text{-N}$ は最大の44.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ であり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は最大の11.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ であった。一方、深度8 m以浅では栄養塩は貧酸素中に比べて少なく、特に深度2-8 mでは、

(e) Chlorophyll concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$)

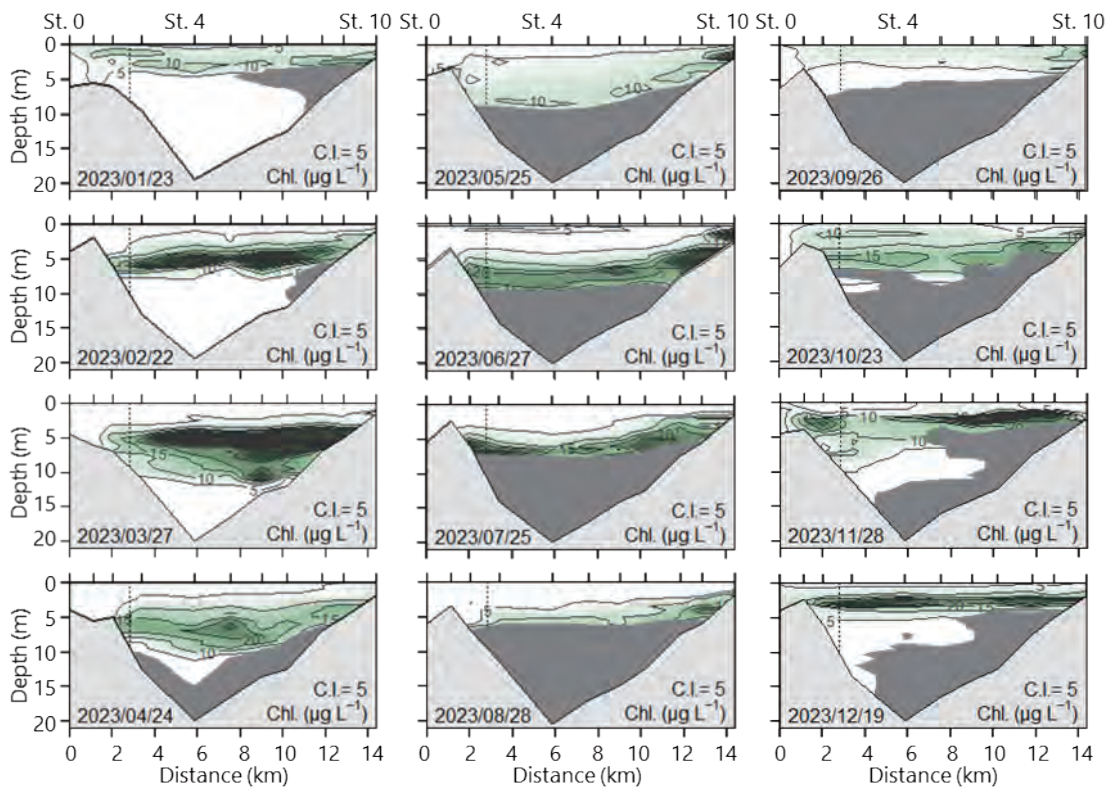


Fig. 4-3 Monthly longitudinal distributions of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity, (c) sigma-t (kg m^{-3}), (d) dissolved oxygen saturation (DO) (%), and chlorophyll concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) in 2023. “C.I.” indicates contour interval. The grey area in Fig. 4-3(e) shows the distribution of hypoxic water mass (DO < 40%), and dotted line indicates the monitoring point located in aquaculture field. (continued)

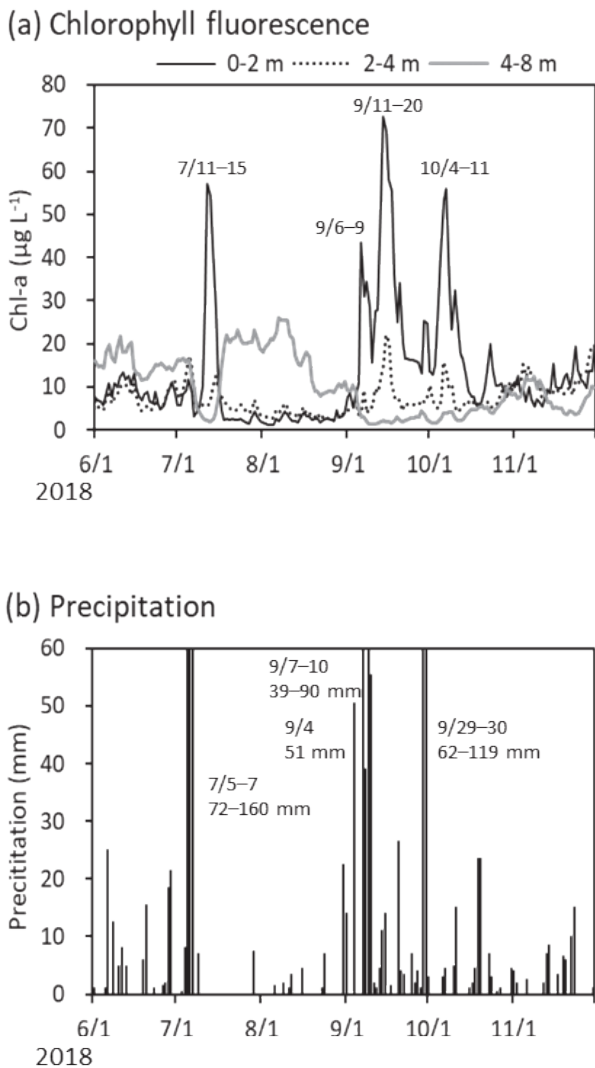


Fig. 4-4 Daily (a) chlorophyll fluorescence at each layer at St. 4 in Kumihama Bay and (b) precipitation in Toyooka City, Hyogo Prefecture from June to November 2018. The numbers in Fig. 4-4(a) indicate periods when chlorophyll fluorescence exceeded $25 \mu\text{g L}^{-1}$ and the numbers in Fig. 4-4(b) indicate periods when precipitation exceeded 50 mm day^{-1} and the ranges of precipitation during these periods.

$\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ の合計である溶存態無機窒素 (DIN) の値は、 $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 以下であった。深度 0 m の表層では他の深度と比較して高い $\text{NO}_3\text{-N}$ がみられ、濃度は $3.6 \mu\text{mol L}^{-1}$ であった。

前日の7月19日には、豊岡で 59 mmday^{-1} の降水が観測された。塩分は深度 0 m の表層で18、深度 2 m で31、深度 4 m 以深で33以上であった。

4.4. 考察

4.4.1. 久美浜湾における季節的な貧酸素水塊の挙動

縦断鉛直観測の結果を元に (Fig. 4-2 および Fig. 4-3), 貧酸素水塊の挙動を以下のように考察した。久美

浜湾では4月から9月ごろにかけて、水温上昇による成層の発達に伴い、下層に貧酸素水塊が形成された。その後、10月から12月にかけて、湾外水の密度が湾内水の密度に対して相対的に大きくなることにより、高D0の湾外水が、湾口から湾中央にかけての中層から底層に徐々に進入していた。10月以降、表層水の水温が低下しても、塩分が低いため、下層に比べて密度が小さく、鉛直混合は起きなかった。12月から1月にかけて、湾外水の密度が湾内水の底層の密度よりも重くなると、底層に湾外水が進入し、底層にあった周囲よりも水温が高い貧酸素水塊は湾奥を中心とした湾全体の中層へと押し上げられた。その後、4月ごろまで湾外水の密度は湾内底層よりも重く、この水平的な酸素の供給により、貧酸素水塊は解消した。このような湾外水の進入深度の変化による貧酸素水塊の消長は柏井 (1989) や第3章の結果と一致する。

4.4.2. 夏季の貧酸素水塊直上の中層クロロフィル極大

縦断鉛直観測の結果 (Fig. 4-2(e) および Fig. 4-3(e)) により、6月から8月の水温成層が強くなる時期に、深度 4 m 以浅のクロロフィル濃度が $5 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下となる一方で、貧酸素水塊の直上にクロロフィル極大が形成されることが明らかになった。極大層が貧酸素水塊の直上数メートルに形成されることがや、この層は深度 4 m 以深であり、塩分が概ね31以上で河川水の影響が小さいことから、河川からの栄養塩を利用して一次生産が行われている可能性は低い。夏季の採水結果では、中下層にある貧酸素水塊中に高い濃度の栄養塩が確認された一方で、上層の栄養塩は少なかった (Fig. 4-5)。成層した上層で栄養塩が枯渇し、中層にクロロフィル極大が形成される例は、外海や内湾、湖沼でも数多く報告されている (藤原ほか, 1997; Nakanishi et al., 1999; Carmack et al., 2004; Weston et al., 2005; Brown et al., 2015; Chen and Zhao, 2021 など)。夏季に強く成層する久美浜湾でも、上層の栄養塩が枯渇し、貧酸素水塊上端の栄養塩を利用して、中層クロロフィル極大が形成されたと考えられた。

4.4.3. 冬季の中層貧酸素とクロロフィル極大

久美浜湾では、10月から12月にかけて、それまで下層にあった貧酸素水塊の一部が湾奥の中層へと押し上げられると、それと同時に深度 5 m 以浅に高濃度のクロロフィル極大が形成された。さらに、1月には、湾奥の一部を除く大部分で貧酸素水塊は解消し、深度 5 m 以浅のクロロフィル極大層は継続した。その後、2月から3月にかけて、クロロフィル極大層の深度は徐々に深くなり、クロロフィル濃度は上昇した。これらのことから、10月から12月にかけては、徐々に深くに進入する湾外水により上昇した貧酸素水塊の一部に含まれる栄養塩を利用して、深度 5 m 以浅のクロロフィル極大が維持され、1月から3月には、貧酸素水塊の解消に伴い、湾全体に

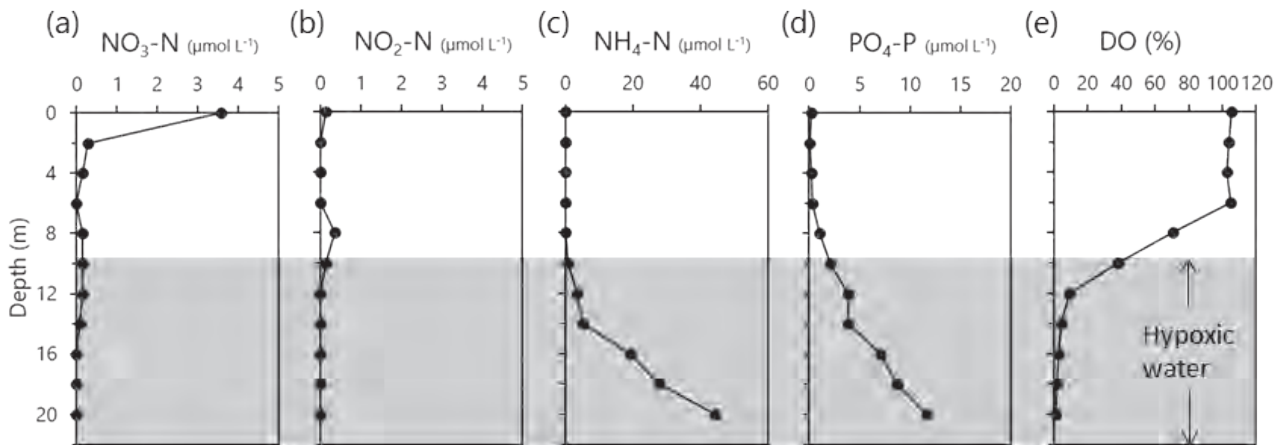


Fig. 4-5 Vertical distributions of (a) NO₃-N (μmol L⁻¹), (b) NO₂-N (μmol L⁻¹), (c) NH₄-N (μmol L⁻¹), (d) PO₄-P (μmol L⁻¹), and (e) DO saturation (%) at the deepest point of the bay (St. 4) at 2 m intervals on 20th July 2022. The grey area in figure shows the depth of hypoxic water mass.

栄養塩が拡散し、この栄養塩を植物プランクトンが浅い方から利用することで、一年で最も大きな植物プランクトンのブルームが起きたと考えられた。

4.4.4. 夏季および秋季の降雨と一時的なクロロフィル増加の関係

6月から11月にかけて、豊岡において 50 mmday⁻¹ 以上の顕著な降水があった 2-7 日後、一時的に 2 m 以浅の表層のクロロフィル蛍光値が上昇した (Fig. 4-4)。また、顕著な降雨の翌日に、湾内表層において NO₃-N が検出されたことから (Fig. 4-5)、河川を通じた栄養塩の供給が一時的な表層のクロロフィル蛍光値の上昇の原因と考えられる。杉本ほか (2004) は、伊勢湾における安定同位体比を用いた研究により、出水後 1 週間以内にブルーミングが起きることを明らかにしており、これは本研究の結果とも概ね一致する。養殖深度である深度 2-4 m では、7月の顕著な降水時にクロロフィルの増大はほとんど見られなかったが、9月以降の顕著な降水時にはクロロフィルの増大がみられた。その上昇幅は表層の半分以下であり、影響は 1 週間程度で終息した。

4.4.5. 養殖深度とクロロフィル極大層の不一致

久美浜湾において、夏季の中層クロロフィル極大層は深度 5-12 m に存在し、クロロフィル濃度は 5-20 μg L⁻¹ であった。二枚貝の垂下養殖は主に深度 2-4 m で実施されており、極大層の深度と一致しない。また、久美浜湾では主に 5 m 以浅に生息する天然二枚貝にも、クロロフィル極大層にある豊富な植物プランクトンがほとんど利用されていないと考えられた。

一方、養殖深度が含まれる深度 5 m 以浅のクロロフィル濃度はおおそ 6 月から 8 月の数か月間にわたって湾全体で概ね 5 μg L⁻¹ 以下であった。この時期には、降水による一時的なクロロフィルの増加がみられるものの、

クロロフィルの増加する深度は主に 0-2 m の表層であり、深度 2-4 m の養殖深度ではほとんど変化がなかった。

二枚貝の成長に必要なクロロフィル濃度は、貝種によって異なる。Nagasoetal. (2019) によれば、トリガイの室内および久美浜湾での実験において、水温が約 25°C の時、軟体部重量を維持するには、クロロフィル濃度は 1.72-5.71 μg L⁻¹、増加させるには 5.71 μg L⁻¹ 以上を維持する必要があるという。さらに、谷本 (2023) によれば、トリガイは 28°C を超えると、濾水量が著しく低下する。7 月から 8 月にかけて、久美浜湾内の養殖場では恒常的に 28°C 以上が観測されており、濾水量が低下した状態では、濾水量の低下分を補うクロロフィル濃度は 5.71 μg L⁻¹ より高くなると考えられる。このことから、閉鎖性海域である久美浜湾でも、トリガイ養殖の 6 月から 8 月にかけての夏季の餌料環境は十分ではないことが示唆された。

マガキ養殖では、養殖海域や実験設定により諸説あるものの、最低限必要なクロロフィル濃度は 1-2 μg L⁻¹ と言われており (長浜ほか, 2005; 松井, 2011; 富川, 2019)、久美浜湾の餌料環境は不十分とは言えない。しかし、クロロフィル濃度とマガキの品質指標や育成には正の相関がみられることや (楠木, 1977; 徳田ほか, 1993; 増田・杉野, 2006)、豊前海 (福岡県) で夏季の成長が他海域よりも良い理由として 4-10 μg L⁻¹ のクロロフィル濃度を挙げていること (徳田ほか, 1993)、宮城県長面浦において短期間でマガキが生産できる要因として 6.7 μg L⁻¹ のクロロフィル濃度を挙げていることなどから (原ほか, 2018)、5 μg L⁻¹ 以上のクロロフィル濃度がマガキ養殖には望ましいと考えられ、夏季における久美浜湾の餌料環境は十分といえない。

アサリについては、長谷川ほか (2015) が 2 μg L⁻¹ 前後のクロロフィル濃度が成長停滞の要因となった可能性を指摘している。三河湾において、芝ほか (2020) は、餌料環境の悪化がアサリの減耗を引き起こしている可能

性があると考察しており、蒲原ほか(2021)は、アサリ資源の維持のためには6-11月にクロロフィル濃度の平均値が $22.3 \mu\text{gL}^{-1}$ 程度必要であると述べている。この数値は表層の複数点の平均値を用いているため、本研究と単純に比較することはできないが、久美浜湾の養殖深度における $5 \mu\text{gL}^{-1}$ 以下のクロロフィル濃度はアサリにとっても十分でないと考えられる。

6月から8月の夏季に中層に形成されるクロロフィル極大は、貧酸素水塊直上に位置しているため、養殖で利用するのは非常に困難である。自動観測装置のデータでは、貧酸素水塊の上端の深度は、内部振動によって時間的に変動することがある。そのため、高いクロロフィル濃度を期待して貧酸素水塊直上で養殖した場合、貧酸素被害が発生する危険性が高い。そのため、貧酸素水塊直上の高濃度のクロロフィルを養殖で利用するのは非常に困難である。また、トリガイは低塩分に対する耐性が非常に小さいため(谷本ほか, 2015)、降水により2 m以浅の上層で一時的に増大するクロロフィルも利用できない。

10月から1月にかけては、クロロフィル極大層と養殖深度が一致することが多くなるものの、一年で最も濃度の高い、2月から4月ごろのクロロフィル極大は養殖深度よりも深い層に出来る傾向があった。この中層クロロフィル極大は、垂下深度を調整することで有効利用できる可能性がある。養殖深度が常に4 m以浅であるのは、貧酸素による被害を避けるためであるが、第3章で示したように、2月以降は、養殖漁場の位置する湾中央から湾口にかけての貧酸素水塊は消失するため、貧酸素水塊の消失を確認したのち、垂下深度を深くすることで昇温期の成長を促進できる可能性がある。

4.5. まとめ

閉鎖性海域である久美浜湾(京都府)において、近年、養殖二枚貝の育成不良が起きている原因を探るため、毎月の縦断鉛直観測と定点における自動鉛直観測を実施し、餌の指標となるクロロフィルの時空間分布について調査した。その結果、クロロフィルが季節を問わず層状に分布しており、その極大層の深度は季節により変動した。深度は4月に最も深くなり、11月から12月ごろに最も浅くなった。

6月から8月にかけての夏季の層状構造の模式図をFig. 4-6に示した。下層で貧酸素水塊が発達すると、その直上である中層にクロロフィル極大層が形成された(Fig. 4-6(a))。一方、養殖深度にあたる上層ではクロロフィル濃度が概ね $5 \mu\text{gL}^{-1}$ 以下であり、栄養塩は枯渇していた。この時期に 50 mm day^{-1} 以上のまとまった降水があると、2-7日後に一時的に深度2 m以浅の表層のクロロフィルが増加したが(Fig. 4-6(b))、養殖深度への影響は極めて小さかった。中層クロロフィル極大は貧酸素水塊直上であるため養殖に活用しづらく、一時的に増加す

る表層のクロロフィルも低塩分であるため利用しづらい。

1月から4月にかけてのクロロフィル分布の変動の模式図をFig. 4-6(c)に示した。久美浜湾では、底層への湾外水の進入により、1月に湾全体で中層貧酸素となり、その後、貧酸素水塊は解消する。1月に貧酸素水塊直上に形成されたクロロフィル極大層は、3月にかけて徐々に深度が深く、濃度が濃くなりつつ、4月ごろまで継続する。この時期、湾口付近の養殖場における貧酸素水塊は解消しているため、モニタリングシステム等を有効活用して適切な深度調整を実施することで、養殖二枚貝の餌料環境を改善できる可能性がある。

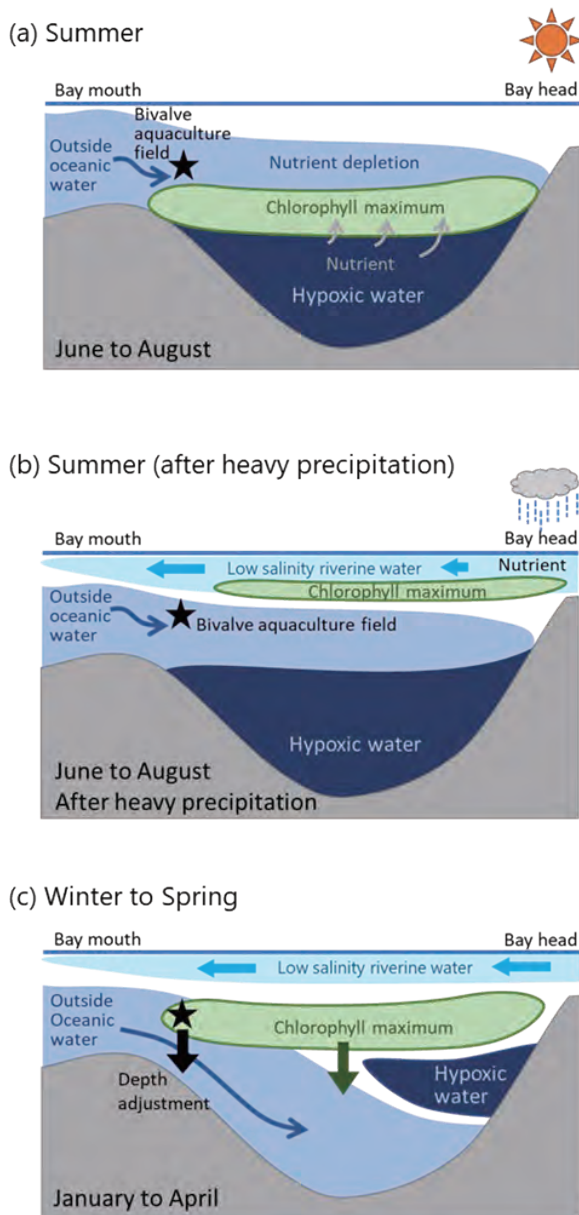


Fig. 4-6 Schematic view of chlorophyll distribution in (a) summer, (b) after heavy precipitation in summer, and (c) from winter to spring.

第5章 養殖を支える貧酸素水塊からの栄養塩供給過程

5.1. 背景と目的

第4章では、久美浜湾における二枚貝養殖において、夏季(6-8月)に餌料環境が良好とは言えない現状を示した。一方、冬季(12-2月)の餌料環境は夏季に比べて良好であり、また春季(3-5月)にかけては中層に発達する植物プランクトン極大層の深度に合わせて養殖深度の調整を実施することで餌料環境を改善できる可能性を示した。

二枚貝の餌料となる植物プランクトンの増殖には栄養塩が必要であるため、持続的な養殖のためには、冬季から春季にかけての栄養塩動態を明らかにし、栄養塩を適切に管理していくことが求められる。栄養塩の供給経路には、河川を通じた陸域からの流入(Withersetal., 2008; Tremblayetal., 2014; Tongetal., 2015 など)、底層における有機物分解や溶出(Percuocoetal., 2015; Boyntonetal., 2017 など)、海面への降雨(Cornelletal., 1995; Taketanietal., 2018 など)、湾口を通じた湾外からの流入(GarsideandGarside, 2004 など)などがある。

第3章において、久美浜湾では冬季から春季にかけて、貧酸素水塊が下層から中層に移動し、解消する過程を示した。一般に、貧酸素水塊中には底層における有機物分解や溶出により多量の栄養塩が含まれていることが多いため、この貧酸素水塊が栄養塩の供給源となり、春季における植物プランクトンの中層極大層の発達(春季ブルーム)に大きく寄与している可能性がある。

第5章では、秋季から翌春における溶存酸素濃度(DO)、クロロフィル濃度、栄養塩濃度、有機物濃度、pHの鉛直分布を同時に調査し、春季ブルームの消長に関する貧酸素水塊からの栄養塩供給過程を明らかにした。さらに、湾内および流入河川における公共用水域水質測定のうち窒素・リン濃度の長期データを併せて解析し、湾内の二枚貝養殖に影響を与える水質の長期変動と現状を示した。

5.2. 材料と方法

5.2.1. 縦断鉛直観測

久美浜湾において、2023年10月から2024年6月にかけて、毎月下旬に縦断鉛直観測を実施した。観測は、湾口から湾奥の川上谷川河口にかけての縦断線上の11点において、CTD(AAQ171, JFEアドバンテック社製)を用いて実施した(Fig. 5-1)。観測項目は水温、塩分、密度、DO、クロロフィル蛍光、pHとした。クロロフィル蛍光については所定の換算式を用いてクロロフィル濃度に換算して解析に使用した。

第3章および第4章の結果をふまえ、それぞれの観測月におけるSt. 0の深度4mの密度を湾外水の密度とし、水深約20mの最深点である湾奥のSt. 4における密度鉛直分布のうち、湾外水の密度と等密度となる深度を進

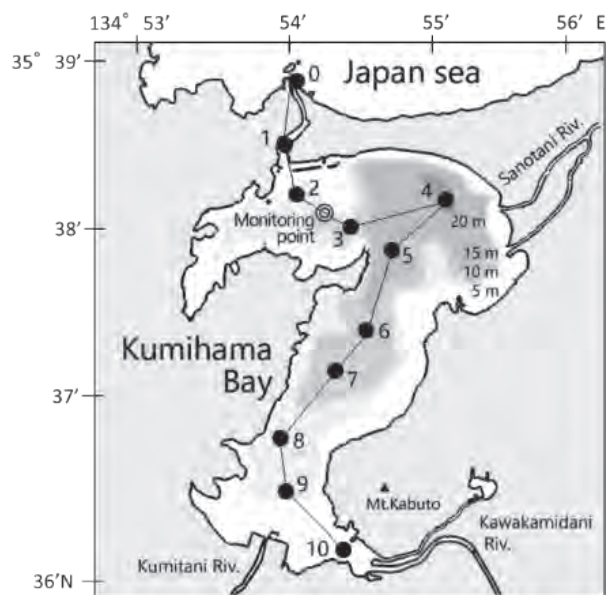


Fig. 5-1 Map of the study area with the water depth (color gradation) and the observation stations. Solid circles with numerals indicate the stations. Double circle indicates the automatic-monitoring point. Solid line represents longitudinal transect.

入深度とした。ここで進入深度は、湾外水が湾内に入る際の最大深度と考えられる。湾外水の密度が湾内底層の密度よりも重い場合は、進入深度を底層にあたる20mとした。

5.2.2. 栄養塩濃度測定

2023年11月から2024年6月にかけて、縦断鉛直観測と同時に採水調査を実施した。採水は、St. 4の深度0mから19.8mまで約2.2mおきに計10層で行い、ろ過した海水中の栄養塩をJISK0126による流れ分析法で測定した。分析にはQuAAtro39(ビーエルテック社製)を使用した。分析項目はアンモニア態窒素(NH₄-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、およびリン酸態リン(PO₄-P)である。

5.2.3. 京都府公共用水域水質測定データの解析

栄養塩を含む水質(全窒素、全リン)の季節変動および長期変動をみるため、久美浜湾に関連する京都府公共用水域水質測定データをWEBから取得して使用した。データは2007年以降のもののうち、久美浜湾内における「佐濃谷川流入点」と「湾奥部」の2測点と、流入河川である佐濃谷川の高橋橋における1測点のものを解析に用いた。なお、「佐濃谷川流入点」はFig. 5-1におけるSt. 4、「湾奥部」はSt. 9に該当する。使用した項目は、全窒素(TN)およびNO₃-N、NO₂-N、全リン(TP)、PO₄-P、河川流量である。NO₃-NおよびNO₂-Nにつ

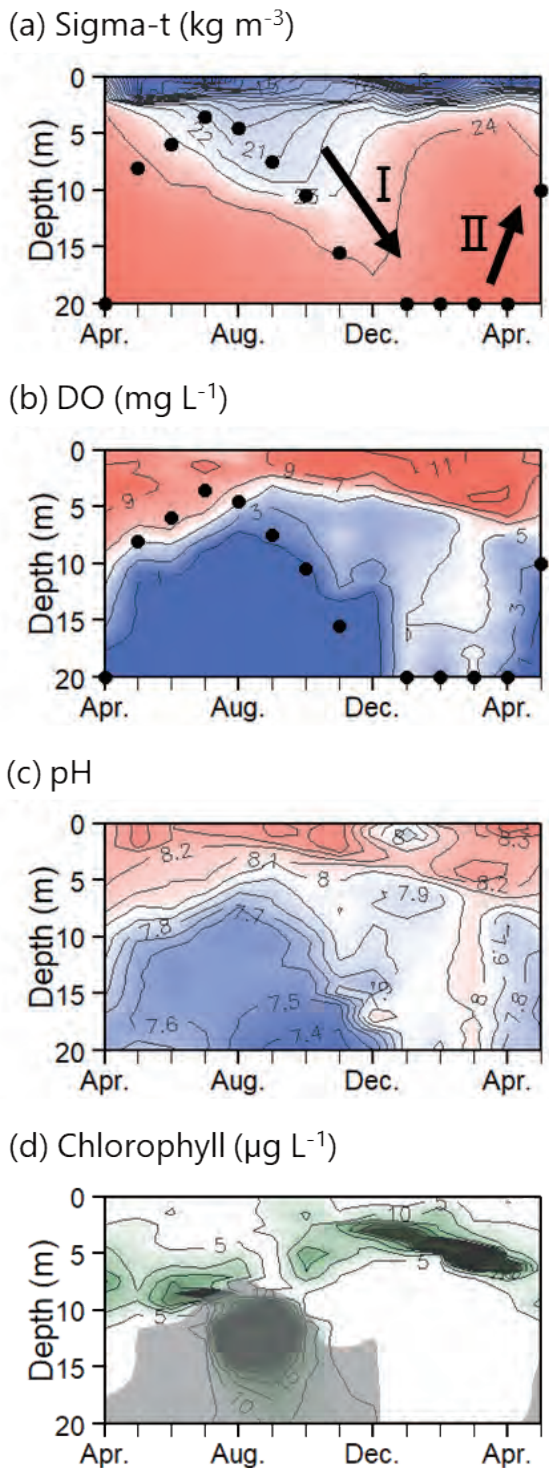


Fig. 5-2 Seasonal variations in vertical distribution of (a) sigma-t (kg m^{-3}), (b) dissolved oxygen (DO) (mg L^{-1}), (c) pH and (d) chlorophyll concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) at the deepest point of the bay (St. 4) from April 2023 to May 2024. The black closed circles in Fig. 5-2(a) and 5-2(b) indicate the depth at which the density is equal to that of the bottom layer at the bay mouth. The grey area in Fig. 5-2(d) shows the distribution of anoxic water mass ($\text{DO} < 1 \text{ mg L}^{-1}$). Arrow with subscript "I" in Fig. 5-2(a) indicates the period when the depth of the water entering the bay becomes deeper, and arrow with subscript "II" indicates the period when the depth becomes shallower.

いては、2009年以降、1年に1回の11月のみのデータであったため、季節変動を見るために、1年に4回、概ね奇数月の観測があった2007年5月から2009年5月のデータを使用した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度は、ほとんどが検出限界以下、あるいはごく少量であったため、河川のデータに関しては $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{NO}_2\text{-N}$ の合計値を溶存態無機窒素(DIN)とした。

5.3. 結果

5.3.1. 湾外水の進入深度の季節変動と湾内の水塊構造

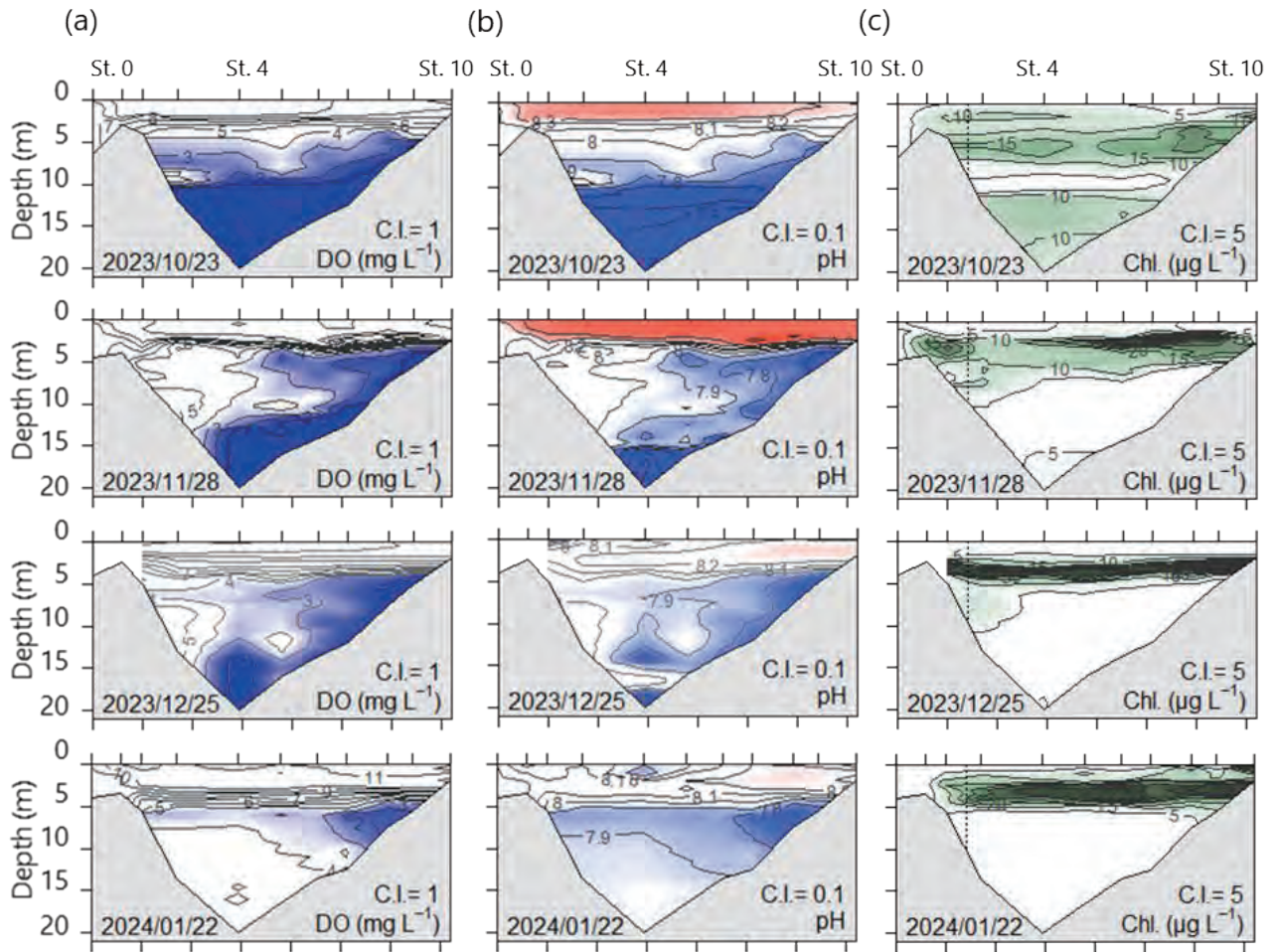
2023年4月から2024年6月のSt. 4における密度、DO、pH、クロロフィル濃度の鉛直分布をFig. 5-2に示した。Fig. 5-2(a), (b)中の黒点は、Fig. 4-2(c)と同様に湾外水の進入深度を表す。湾外水の進入深度は10月から1月にかけて徐々に深くなり、底層に達した(Fig. 5-2(a)中のI期)。1月から4月までは湾外水が底層に進入する状態が継続し、4月以降には底層である深度20mから約10mへと浅くなった(Fig. 5-2(a)中のII期)。

湾外水の進入深度の季節変動と貧酸素水塊の消長はよく対応していた。湾外水の進入深度が深くなる時期(I期)に、DOが 1 mgL^{-1} 以下の無酸素水塊は縮小し、1月には消滅した。1月から4月まで無酸素水塊は存在しなかった。進入深度が再び浅くなって中層付近の10mとなる5月には(II期)、10m以深がDOが 3.0 mgL^{-1} 以下の貧酸素となり、15m以深は再び無酸素となった。またpHが7.9以下の水塊の分布は、上に述べた無酸素水塊の分布と同様の季節変動を示した。ただし無酸素水塊中のpHは一定ではなく下層ではさらに低い値となり、8月から12月にかけて底層付近でpH7.4まで低下した。このようにDOの値は無酸素水塊中では一定(0 mgL^{-1})になるが、pHの分布は水塊の構造をより詳細に表していた。

同時期のpH、DO、クロロフィル濃度の鉛直断面図をFig. 5-3に示した。すべての結果において、DOの高い海水はpHが高く、DOが低い海水はpHが低くなっており、DOの分布とpHの分布はよく一致していた。湾外水の進入深度が深くなる時期(I期)の10月から11月の結果では、中層にDOが 3 mgL^{-1} 以上とやや高く、pHも7.9以上の水塊が広がっていくのがわかる。この水塊は12月には深度18mに達し、1月にはほぼ湾全体の深度10mから底層までを覆う状態となった。一方、湾奥を中心に湾全体の深度6-9m付近の中層にはDOが 4 mgL^{-1} 以下、pHが7.9以下の水塊が残存した。湾外水の進入深度が浅くなる時期(II期)である4月以降には、深度10m以深にDO、pHがともに低い水塊が再び確認された。

クロロフィルの分布は、DOが 3 mgL^{-1} 以下の貧酸素水塊の分布と強い関連があった。10月には貧酸素水塊の上端である深度8mから表層にかけて $5\text{-}20 \mu\text{gL}^{-1}$ のクロロフィルが存在し、11月には、St. 4よりも湾奥側の貧酸素水塊の直上である深度2-4mの層に、10月よりもさらに濃度が高い $20 \mu\text{gL}^{-1}$ 以上のクロロフィル極大層が

I



II

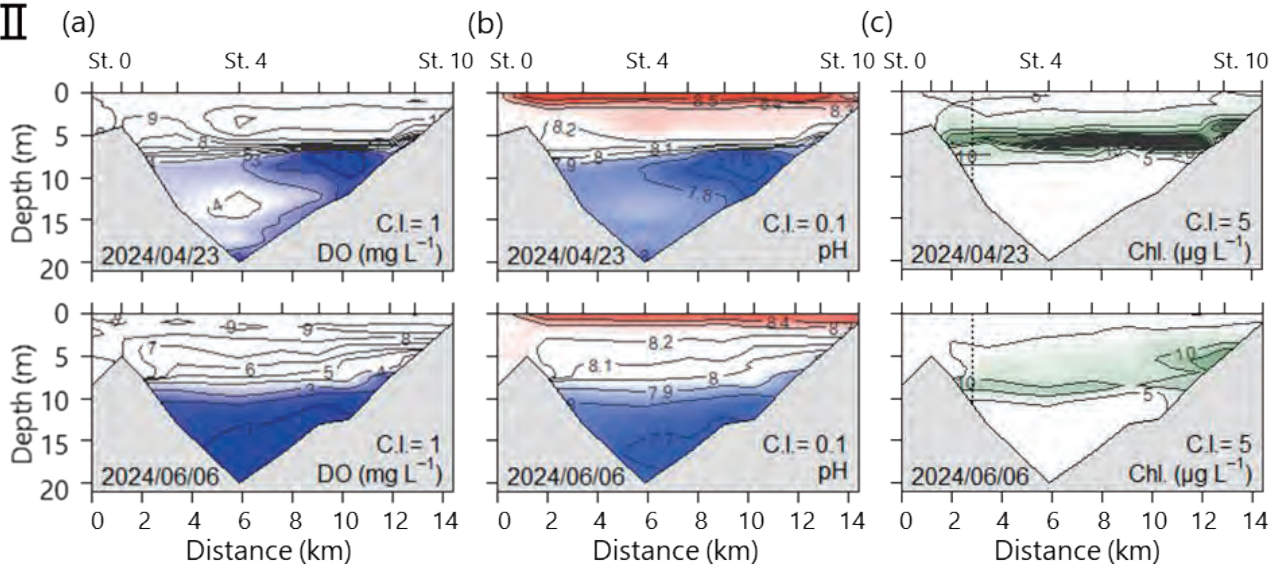


Fig. 5-3 Monthly longitudinal distributions of (a) DO (mg L^{-1}), (b) pH and (c) chlorophyll ($\mu\text{g L}^{-1}$). Upper figures (I) and lower figures (II) correspond to each period I and II in Fig. 5-2(a).

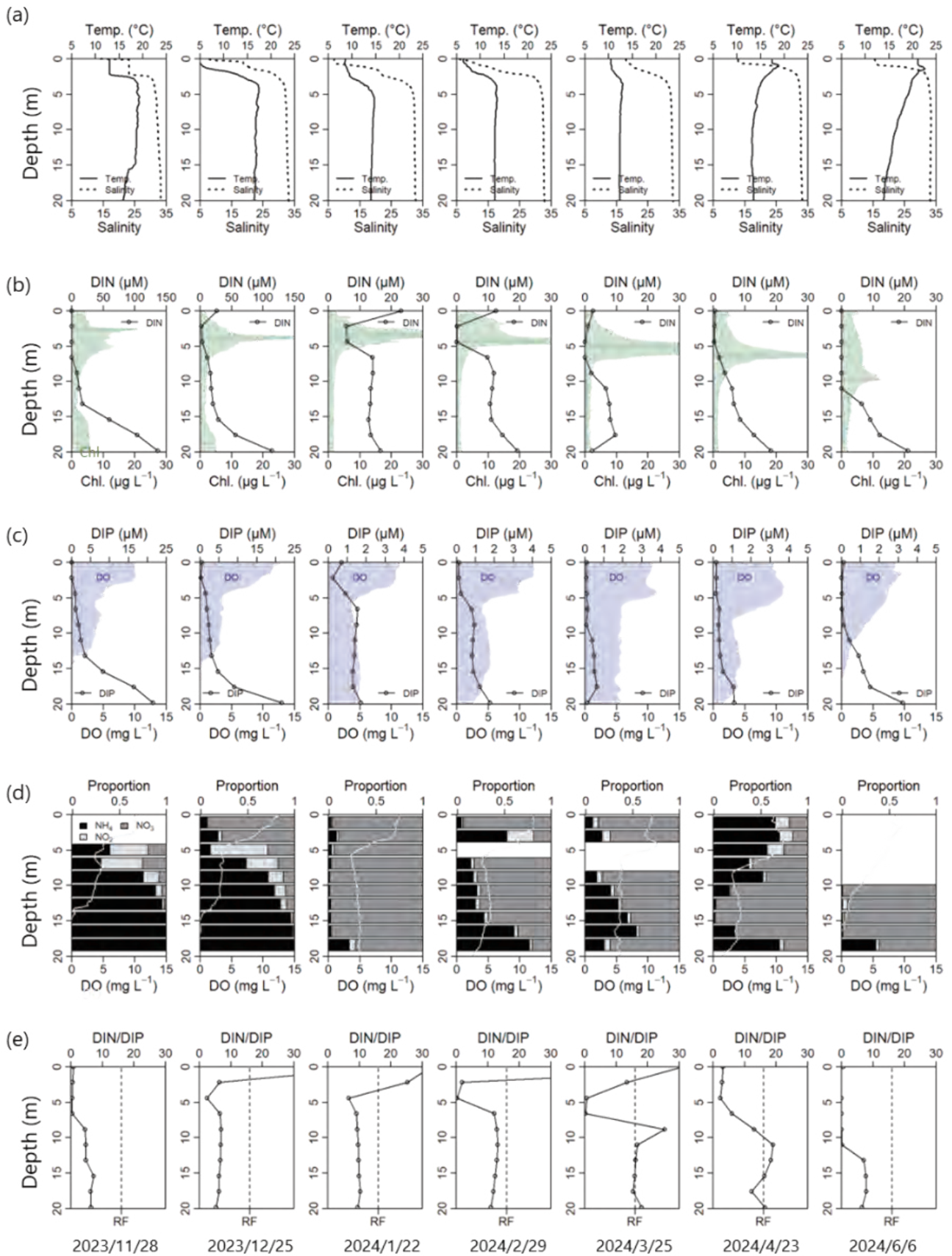


Fig. 5-4 Monthly vertical distributions of (a) temperature(°C) and salinity, (b) DIN(μM) and chlorophyll (μg L⁻¹), (c) DIP (μM) and DO (mg L⁻¹), (d) DIN proportion and DO (mg L⁻¹) and (e) DIN/DIP ratio at St. 4 from November 2023 to June 2024.

形成された。このクロロフィル極大は、12月には湾全域へと拡大し、1月にも継続した。湾外水の進入深度が浅くなる時期(Ⅱ期)である4月には、クロロフィル極大は深度5-7 mに存在し、濃度は最大で80 μgL^{-1} であった。6月の深度10 m以浅のクロロフィル濃度は5-10 μgL^{-1} であり、4月と比較して低かった。

5.3.2. 栄養塩分布と溶存酸素濃度およびクロロフィル分布の関係

縦断鉛直観測と同時に観測した湾央のSt. 4における2023年11月から2024年6月までの水温、塩分および栄養塩の分布をFig. 5-4に示した。深度3 m以浅の塩分はそれ以深に比べて常に低く、特に12月から2月にかけて、深度1 m以浅の表層の塩分は10以下であった。12月から4月にかけて、深度5 m以深の水温および塩分はほぼ同様であった(Fig. 5-4(a))。

Figure5-4(b), 5-4(c)にそれぞれ溶存無機態窒素(DIN)とクロロフィル濃度、溶存無機態リン(DIP)とDOの鉛直分布を示した。11月および12月に、深度15 m以深はほぼ無酸素であり、この無酸素水塊中の栄養塩濃度はDIN, DIPともに、DOが2 mgL^{-1} 以上の層に比べて高かった。1月に下層の無酸素状態は解消され、深度5 m以深のDOは約5 mgL^{-1} でほぼ鉛直一様となり、DINおよびDIPの濃度も同様にほぼ鉛直一様であった。4月以降、底層のDOは低下し、栄養塩濃度は上昇した。

Figure5-4(d)にDINの組成をDOの鉛直分布とともに示した。DOの分布と対応してDINの組成は変化し、DOがほとんど存在しない下層では $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が多く、DOが存在する上層へいくにしたがって $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が多くなった。特に、11月および12月の無酸素水塊中では、DINはほぼ全て $\text{NH}_4\text{-N}$ で存在していたが、DOが存在する深度5-15 mでは一部 $\text{NO}_2\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ が混在し、その割合は深度が浅くなるにつれ、徐々に高くなった。5 m以深でDOが一様に5 mgL^{-1} となった1月には、底層付近でわずかに $\text{NH}_4\text{-N}$ がみられたのを除き、水柱全体でDINのほぼ全てが $\text{NO}_3\text{-N}$ の状態が存在していた。4月以降、再び底層のDOが低下すると $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が増加した。例外的に、4月の10 m以浅ではDOが高いものの、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が最も多かった。

Figure5-5(b)のDINの結果にクロロフィル濃度の鉛直分布を併せて示した。期間を通して、クロロフィルが豊富な深度帯にはDINが少なく、特に1月以降、クロロフィル極大層の深度が深くなるにつれ、上層から順にDINが減少していく様子が確認された。11月には、クロロフィルの豊富な深度8 m以浅のDINは1 μM 以下であった。12月から1月にかけて深度8 m以浅でDINは増加したものの、クロロフィル極大層のある深度2-4 mのDINは他の深度帯よりも少なかった。2月になると、この深度帯のDINはさらに減少し、1 μM 以下となった。1月から5月にかけて、クロロフィル極大層の深度は3 mから深

度10 mへと深くなり、それに伴って上層から順にDINが減少していき、6月6日には深度8 m以浅のすべての深度でDINは0 μM となった。

11月および12月に存在した栄養塩を多量に含む下層の水塊のDIN/DIP比は6程度であった(Fig. 5-4(e))。1月から2月にかけてDIN, DIPの濃度は低下したが、DIN/DIP比は上昇し、3月から4月にかけて下層のDIN/DIP比は約16となった。DOが低下する6月には再び6程度になった。

5.3.3. 貧酸素水塊形成期における有機物および栄養塩の鉛直分布

2024年6月6日に実施した詳細な採水分析結果をFig. 5-5に示した。粒状有機態炭素(POC)と粒状有機態窒素(PON)、および溶存有機態炭素(DOC)、溶存有機態窒素(DON)、溶存有機態リン(DOP)はいずれも、深度15 m以浅において、上層の濃度が高く、深度が深くなるにつれて濃度が低くなった。一方、溶存態無機態窒素(DIN)は深度10 m以浅で0 μgL^{-1} であったのに対して、10 m以深では深度が深くなるほど濃度は増加した。全窒素(TN)は10 m以浅では濃度が概ね一定であるのに対して、10 m以深では深くなるにつれて濃度が上昇した。そのため、TNに対するDINの割合も深度が深くなるほど増加し、底層付近では窒素の約70%がDINの状態が存在した。見かけの酸素消費量(AOU)は深度5 m以深ですべて正の値であった。塩分は表層の0 mで15、深度2 mで約31.5であり、3 m以深では概ね33で一定であった。

5.3.4. 流入河川および湾内表層の栄養塩の季節変動

久美浜湾への主要な流入河川である佐濃谷川のTNおよびDINの季節変動をFig. 5-6(a)に示した。TNに明確な季節変動はみられなかったが、DINおよびTNに対する割合には明確な季節変動がみられた。TNに占めるDINの割合は、5月に30%程度と最も低く、1月に90%程度と最も高かった。

佐濃谷川における11月から5月にかけての平均的な流量の季節変化、および豊岡における降水量の季節変化をFig. 5-6(b)に示した。降水量は12月ごろから増加し、1月に年間で最大となる。河川の平均流量は、1月から3月に年間で最大となった。栄養塩分析を実施した2023年11月から2024年6月にかけてのSt. 4における、深度0 mの塩分とDINおよびDIPの季節変動を、Fig. 5-6(c)および(d)に示した。表層の塩分は11月には20程度あったが、12月から2月にかけては比較的低い10以下の値となり、3月以降には再び上昇して15-20で推移した。表層のDINおよびDIPはともに11月には少なかったが、12月および1月にかけて増加した。2月以降は減少し、3月から6月にかけては12月および1月と比較して低く推移した。

5.3.5. 流入河川および湾内表層の栄養塩の経年変化

主要な流入河川である佐濃谷川の TN および DIN と、湾中央部の深度 0.5 m における TN および DIN の経年変化を Fig. 5-7(a) および (b) に示した。佐濃谷川の DIN 測定は 1 年のうち 11 月のみであるが、TN については年 2 回のデータがある。TN は 2007 年から有意に減少しており、近年は 15-30 μM 程度で推移していた。一方 DIN については、期間全体を通じて概ね 10-20 μM であった。

湾内表層の TN は河川の TN に比べてさらに顕著に減少しており、2019 年以降は久美浜湾が指定されている類型 II の環境基準である 0.3 mgL^{-1} ($\approx 21.4 \mu\text{M}$) を常に下回っており、 0.2 mgL^{-1} ($\approx 14.3 \mu\text{M}$) 以下の観測値も多くみられた。河川及び湾中央部表層の TP に明確な経年変化はみられなかった (Fig. 5-7(c), (d))

5.3.6. 湾中央部下層および湾奥部における全窒素・全リンの経年変化

湾中央部の St. 4 における深度 10 m の TN の経年変化を Fig. 5-8(a) に示した。2007 年から 2023 年にかけて、ばらつきが大きいものの、有意に減少していた。2018 年以降に TN が環境基準値である 0.3 mgL^{-1} ($\approx 21.4 \mu\text{M}$) を超えたのは、2018 年 9 月の 1 回のみ ($22.1 \mu\text{M}$) であった。

次に、湾奥部の下層における TN および TP の変動を Fig. 5-8(b) および (d) に示した。湾奥部の深度 4-5 m における TN の濃度は季節変動を繰り返しながら単調に減少していた。TN および TP は 1 月に年間最大となるものがほとんどであった (Fig. 5-8(b), (d))。TP や COD (図省略) には明確な経年変化はみられなかった。

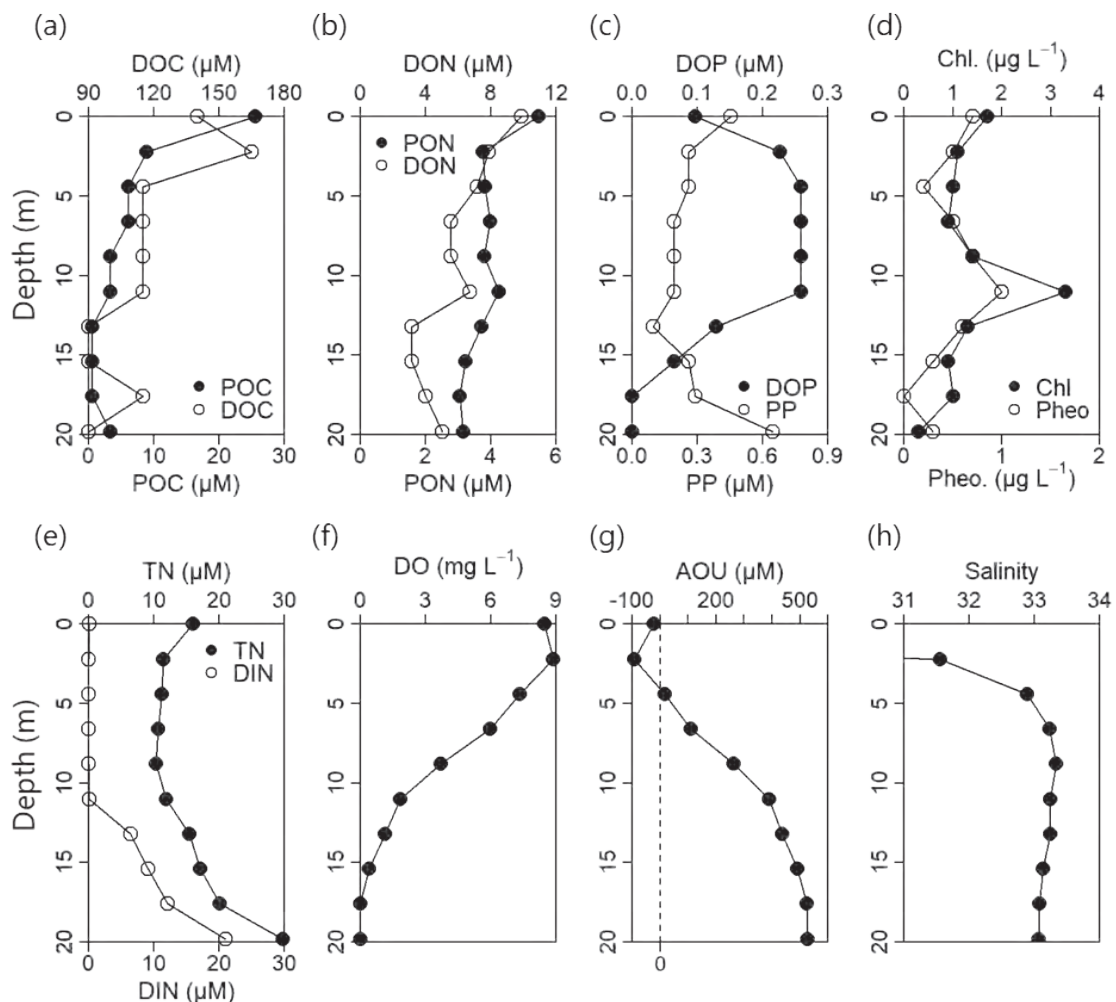


Fig. 5-5 Vertical distributions of (a) Dissolved Organic Carbon (DOC) and Particulate Organic Carbon (POC) (μM), (b) Dissolved Organic Nitrogen (DON) and Particulate Organic Nitrogen (PON) (μM), (c) Dissolved Organic Phosphate (DOP) and Particulate Phosphate (PP) (μM), (d) Chlorophyll and Pheophytin ($\mu\text{g L}^{-1}$), (e) Total Nitrogen (TN) and Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) (μM), (f) Dissolved Oxygen Concentration (mg L^{-1}), (g) Apparent Oxygen Utility (AOU) (μM) and (h) Salinity at St. 4 in June 6, 2024.

5.4. 考察

5.4.1. 貧酸素水塊からの栄養塩供給

第3章の結果から、久美浜湾では、10月から11月にかけて、湾口を通じて進入する湾外水の進入深度が次第に深くなり、1月に底層に達することが示唆された。貧酸素水塊は進入深度が深くなると中層に移動し、底層に達する1月に解消した。11月ごろまで下層に存在した貧酸素水塊中には多量の $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ が含まれており、湾外水の湾内への進入深度が季節的に深くなる過程で、貧酸素水塊中の栄養塩も中層へと拡散すると考えられる。酸素の供給があれば $\text{NH}_4\text{-N}$ は $\text{NO}_2\text{-N}$ を経て $\text{NO}_3\text{-N}$ の状態へと変化するため、酸素を豊富に含む湾外水の進入深度の変化は窒素の組成変化によっても確認できた(Fig. 5-4(d))。湾外水の進入深度が底層に達し、貧酸素水塊の大部分が解消する1月になると、栄養塩の鉛直勾配がほぼなくなったことから、貧酸素水塊中の栄養塩は鉛直的に湾全体へと拡散したと考えられる。貧酸素水塊中のDIN/DIP比は6程度であり、これが保存的に拡散した場合、比は変わらず濃度だけが減少すると考えられるが、1月に湾全体に分布する栄養塩のNP比は約10で

あった。DIN/DIP比が上昇した理由として、下層に進入した湾外水にDIN/DIP比の異なる栄養塩が含まれていた可能性が考えられる。湾外水である日本海の深度100 m以浅における、11月から4月のDINは2-5 μM 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は0.3 μM であると言われており(Nishikawa et al., 2022)、DIN/DIP比は6-17である。この値は貧酸素水塊から拡散された栄養塩のNP比に比べて高く、湾外水が進入する時期に湾内のDIN/DIP比が上昇していたことから、貧酸素水塊中の栄養塩が拡散する過程で湾外水の栄養塩も付加されたことが示唆された。

1月に湾全体へと拡散した栄養塩は、1月から3月にかけての植物プランクトンの中層極大層の発達(春季ブルーム)に利用されたと考えられる。クロロフィル極大層の深度が徐々に深くなるのと連動し、上層から順に栄養塩、特にDINが枯渇した。ただし4月の上層にはごく低濃度ながら栄養塩が存在した。系内の有機物分解から生じた $\text{NH}_4\text{-N}$ を主に用いる一次生産は再生生産と言われ、系外からの栄養塩を利用する新生産と区別される(Lallian and Parsons, 1995)。4月の深度10 m以浅のDINの内訳は $\text{NH}_4\text{-N}$ が半分以上を占めており(Fig. 5-4(d))、

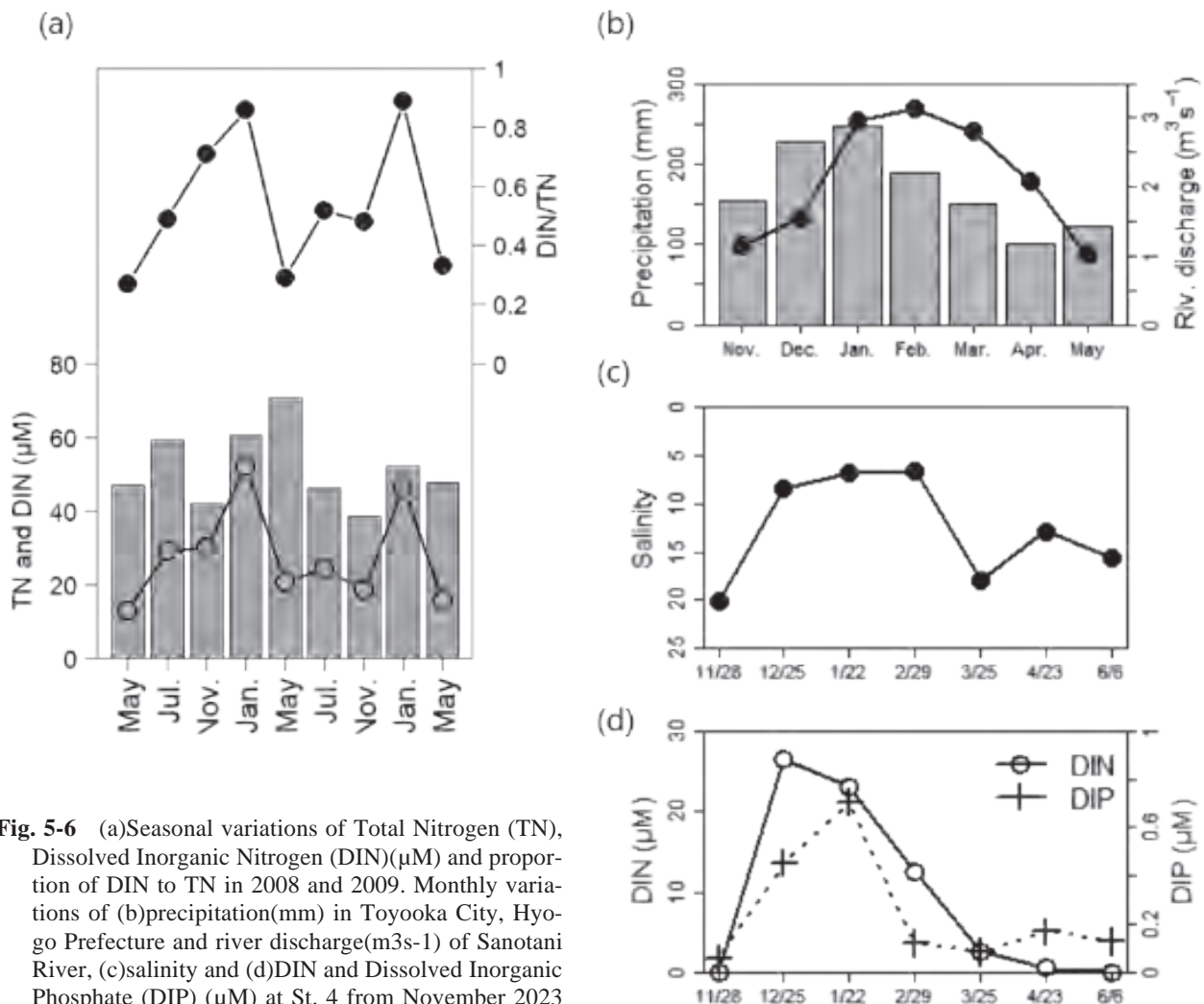


Fig. 5-6 (a) Seasonal variations of Total Nitrogen (TN), Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) (μM) and proportion of DIN to TN in 2008 and 2009. Monthly variations of (b) precipitation (mm) in Toyooka City, Hyogo Prefecture and river discharge (m^3s^{-1}) of Sanotani River, (c) salinity and (d) DIN and Dissolved Inorganic Phosphate (DIP) (μM) at St. 4 from November 2023 to June 2024.

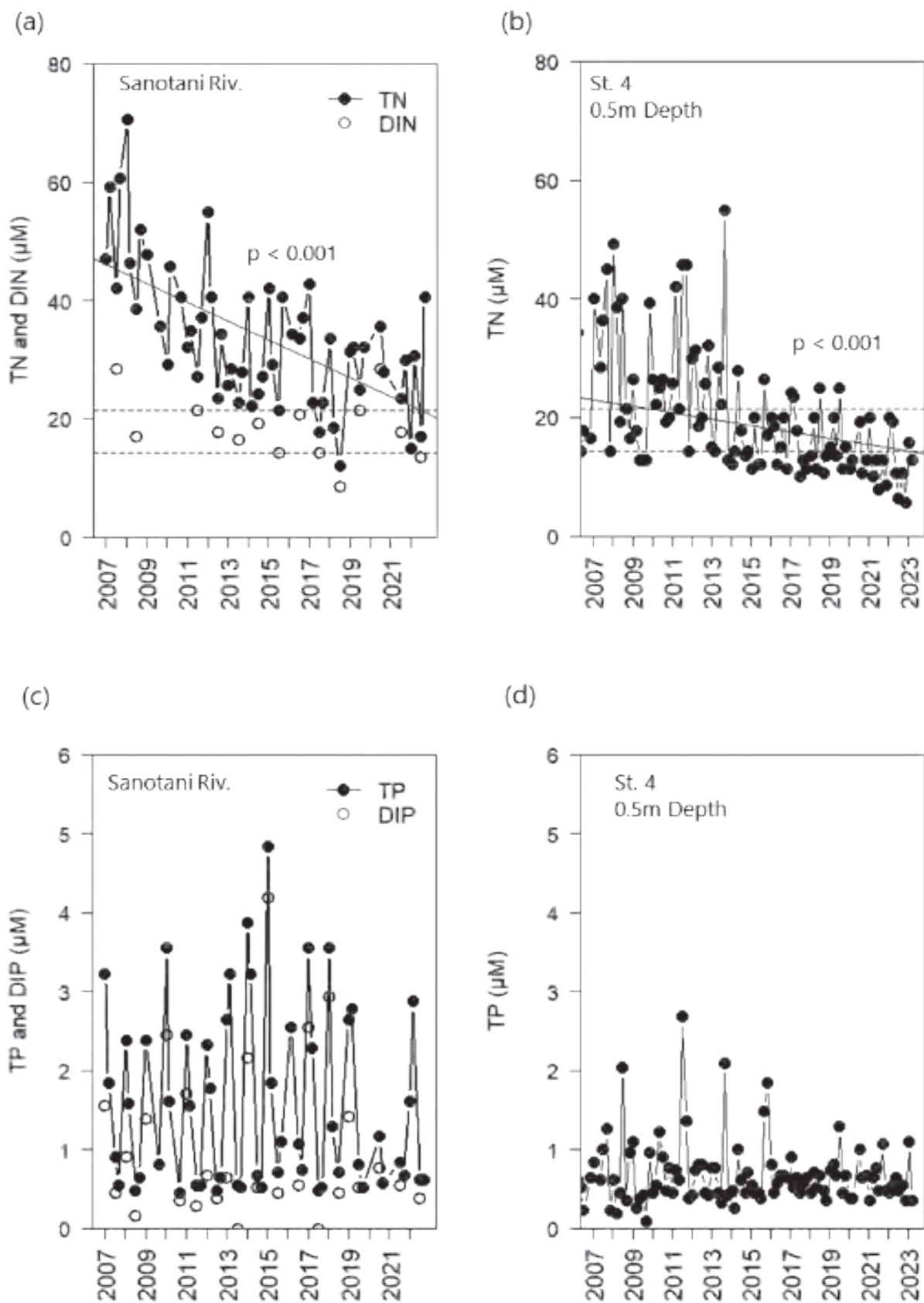


Fig. 5-7 Long-term variations of (a) Total Nitrogen (TN) and Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN)(μM) at river mouth of Sanotani River, (b) TN in the surface (0.5 m depth) of St. 4, (c) Total Phosphate (TP) and Dissolved Inorganic Phosphate (DIP) (μM) at river mouth of Sanotani River and (d) TP in the surface (0.5 m depth) of St. 4. The two parallel dotted lines in Fig. 5-7(a) and 5-7(b) represent values of 21.4 and 14.3, respectively. The diagonal line with the p-value is regression line.

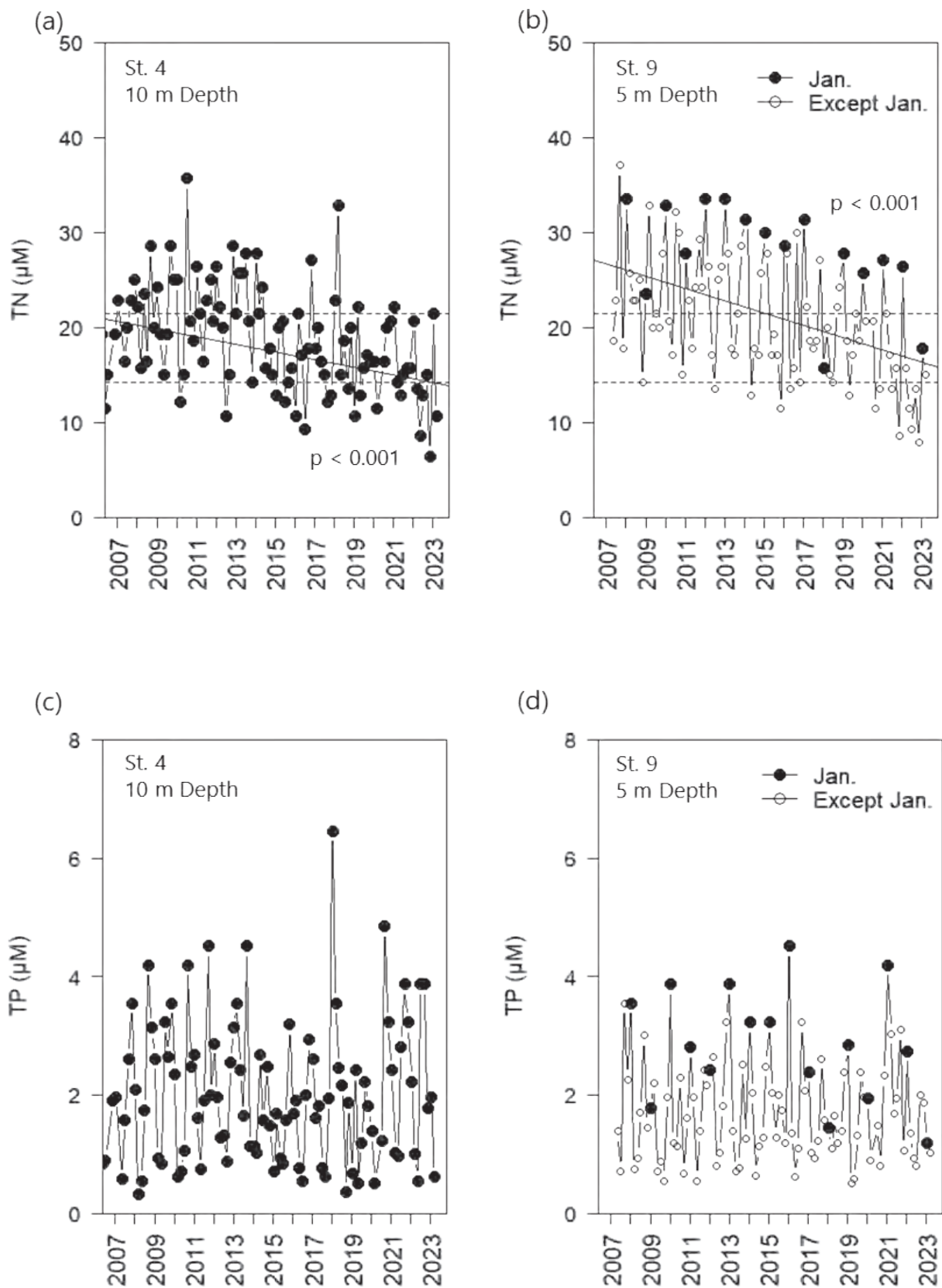


Fig. 5-8 Long-term variations of (a) Total Nitrogen (TN) (μM) in middle layer (10 m depth) of St. 4, (b) TN in the bottom layer (5 m depth) of St. 9, (c) Total Phosphate (TP) (μM) in middle layer (10 m depth) of St. 4 and (d) TP in the bottom layer (5 m depth) of St. 9. Solid circles in Fig5-9(b) and (d) indicate data in January, open circles indicate the data except in January. The two parallel dotted lines in Fig. 5-7(a) and 5-7(b) represent values of 21.4 and 14.3, respectively. The diagonal line with the p-value is regression line.

3月以降、上層では新たな栄養塩の供給は少なく、増殖した植物プランクトンがその場で分解される再生生産により一次生産が維持されていたと考えられた。その後、生成された有機物は徐々に沈降や分解により減少し、6月上旬の時点で深度10 m以浅の上層のDINは完全に枯渇していた(Fig. 5-4(b))。

6月の成層期初期には、下層に高濃度のTNおよびTPが蓄えられ、その大部分が無機態の栄養塩として存在した(Fig. 5-5)。有機物の無機化の過程で酸素が消費されるため、下層は貧酸素化し、結果的に貧酸素水塊中に栄養塩が蓄えられると考えられた。

5.4.2. 河川および湾外からの栄養塩供給

流入河川のTNにおけるDINの割合は明瞭な季節変動を示し、5月ごろに30%程度で最低となり1月に90%程度で最大となった(Fig. 5-6)。河川水中のNO₃-Nが陸上植物の休眠期である冬から春に多く、植物が生長する夏に少なくなる季節変動は森林に囲まれた溪流などではよく知られている(MurdochandStoddard,1993;Williamsetal.,1996;SickmanandMelack,1998;KasteandSkjelkvale,2002;Driscollletal.,2003など)。久美浜湾の流入河川の流域は田畑や山林が多く、大規模な住宅街や工場地帯はなく、夏は陸上植物により多くのDINが消費されている可能性がある。一方、冬には流入河川のDINの濃度は上昇した。久美浜湾周辺の冬の気候は、雪や雨が多く、日照時間が少ないため、陸上植物による消費の影響が小さくなったことが要因として考えられる。さらに、12月から2月にかけて、冬の降水と融雪により河川流量が増加するため、栄養塩濃度の上昇と流量の増加の両方により、冬の湾内表層には低温・低塩分でNO₃-Nを多く含んだ水塊が存在した。12月以降、表層付近にクロロフィルが確認されたのは1月および2月のみであり、濃度も低かったことから、河川からの栄養塩供給の一次生産への影響は大きくないことが示唆された。

前述のとおり、夏季の河川からのDIN供給は少なく、湾内上層の栄養塩も枯渇しているが、他海域では夏季の大雨が海域に栄養塩を一時的に供給することも知られている(古賀ほか,2022)。久美浜湾でも、豊岡で59mmday⁻¹の大雨が観測された翌日の2022年7月20日の湾内表層の塩分は18で、DIN濃度は3.7 μMであった(第3章)。近年の佐濃谷川下流のTNを約25 μM、そのうちのDINの割合を30%とし、栄養塩が枯渇した海水(塩分31)とこの河川水(塩分5)が当量で混合した(塩分約18)と仮定すれば、湾内表層の栄養塩濃度は3.8 μM程度となり、ほぼ実測値と一致する。この栄養塩供給による一次生産はごく表層において短期間で終息する(第3章)。

湾外水である日本海の海水中の栄養塩の濃度についても季節的に変動することが知られており、深度100 m以浅の11月から4月のDINは2-5 μM、PO₄-Pは0.3 μM

であり、5月から10月のDINは1.0 μM以下、PO₄-Pは0.3 μMと言われている(Nishikawaetal.,2022)。久美浜湾では湾外水の進入する時期・深度にクロロフィル濃度の上昇は確認されていない一方、貧酸素水塊の直上にクロロフィル極大層が発達することが確認されており、湾外水に由来する栄養塩の一次生産への影響は貧酸素水塊由来の栄養塩に比べて限定的であると考えられた。

5.4.3. 栄養塩の経年的な変化

京都府公共用水域水質測定データの解析結果から、河川を通じた栄養塩の供給は中長期的に減少しており、下層に蓄積する全窒素の量も減少していることが示唆された。藤原ほか(2020)はTNが0.2 mgL⁻¹(≈14.3 μM)以下の海域では一次生産量が低く、外洋性の特徴を持つとしている。このことから、日本の水産用水基準において漁船漁業に適さない基準はTNが0.2 mgL⁻¹(≈14.3 μM)以下とされている(日本水産資源保護協会,2018)。久美浜流入河川の流域では、1997年に浄化施設が供用開始され、処理水は久美浜湾外の日本海へと放流されている。その後、現在にいたるまで、各戸の下水道接続率は増加し続けている。近年、河口付近のTNは15-30 μMの範囲にあり、湾内表層では14.3 μMを下回る値が増加している。

また、久美浜湾の貧酸素水塊は、夏季に概ね深度10 m以深に形成され、毎年1月ごろに湾奥を中心とした深度5 m付近に上昇する(Fig. 3-5)。下層に蓄積されている有機物や栄養塩を反映していると考えられる湾奥部の深度10 mのTNや、毎年1月に年間で最大となる湾奥の深度5 mのTNも長期的に減少しており、春のブルームに繋がる下層からの栄養塩供給はこれに従って減少していると考えるのが妥当であろう。さらに、湾外水にあたる日本海の栄養塩はDINおよびDIPともに長期的に減少しているという(Kodamaetal.,2016;Parketal.,2023)。これらの傾向に変化がない限り、湾内の一次生産量は今後も減少することが予測される。

5.5. まとめ

春季ブルームの消長に関与する貧酸素水塊からの栄養塩供給の過程を明らかにするために、縦断鉛直観測と共に栄養塩濃度の測定を実施した。その結果、下層の貧酸素水塊中に多量に含まれていた栄養塩が、湾外水の進入深度が次第に深くなる秋季から冬季にかけて、徐々に湾内全体の上中層へと拡散され、翌春の植物プランクトンのブルームにつながると考えられた(Fig. 5-9(b),(c))。その後6月までに上層の栄養塩は全て消費されて枯渇しており、同時に、増加した有機物は沈降して分解され、酸素を消費するであろう(Fig. 5-9(d))。湾外水の進入深度が浅くなり下層の水塊が孤立する6月以降には、貧酸素化が確認されており(Fig. 5-9(a))、このことを裏付けている。

日本で最も閉鎖的な久美浜湾内における有機物および栄養塩の循環は、Fig. 5-9に示したように、湾外水の進入深度の季節変化に伴う湾内の鉛直循環流の深さと密接に関係していた。湾外および陸域からの栄養塩の流入はいずれも長期的に減少している可能性が高く、湾内に蓄積されている栄養塩も長期的に減少している可能性が示唆された。今後、持続的に二枚貝養殖を続けるためには、これらの現状を考慮した上で、栄養塩を適切に管理していく必要がある。

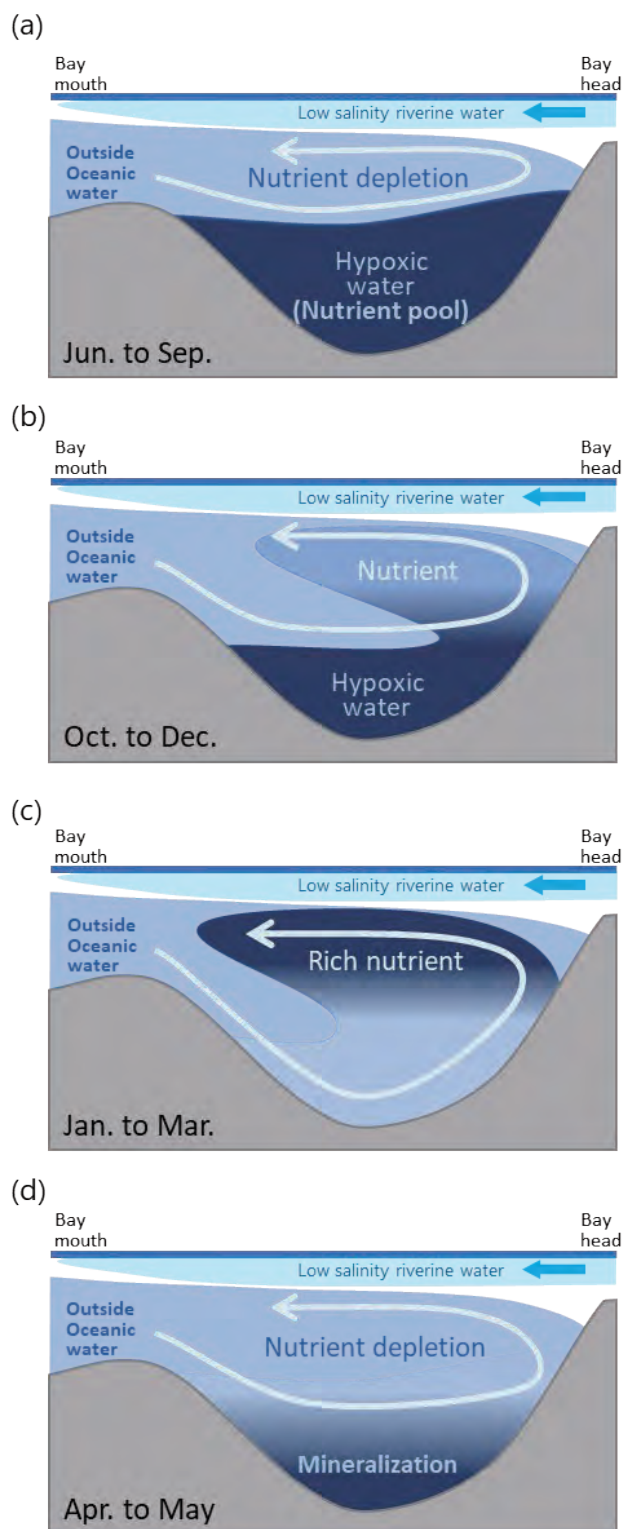


Fig. 5-9 Schematic view indicating nutrient distribution in vertical section in the period of (a) shallow Estuary Circulation (EC) (June to September), (b) deepening EC (October to December, the period I in Fig. 5-2(a)), (c) deep EC (January to March) and (d) shallowing EC (April to May, the period II in Fig. 5-2(a)).

第6章 総合考察

6.1. 本研究の成果

第2章では、二枚貝養殖漁場における冬季の調査により、久美浜湾における冬季の養殖二枚貝の死滅の主な原因が貧酸素水塊であることを解明し、第3章では、秋から翌春にかけての毎月の鉛直縦断観測と1時間おきの自動鉛直観測により、冬季に貧酸素水塊が養殖深度である中層にまで上昇する機構を示した。第4章では、1年を通じた縦断鉛直観測により、クロロフィルが1年を通して層状に分布しており、その極大層の深度が貧酸素水塊の挙動と連動して明確に季節変動することを明らかにした。第5章では、鉛直的な栄養塩濃度分析を1か月ごとに実施し、春の植物プランクトンブルームにつながる貧酸素水塊からの栄養塩供給過程と下層への栄養塩の蓄積過程を解明し、公共用水域水質測定の結果と併せて、湾内下層に毎年蓄積される栄養塩が長期的に減少している傾向を示した。

これらの知見は二つの固定概念を覆した。一つは、養殖に被害を及ぼすような貧酸素は夏季にのみ発生し、冬季には発生しない、もう一つは、極めて閉鎖的で栄養塩が豊富な海域では、二枚貝の餌料環境は良好である、という概念である。閉鎖性海域や汽水湖の養殖漁場において、これまで夏季から秋季における貧酸素水塊の発生については多数報告があるが(阿保ほか, 1998; 瀬戸ほか, 2004; Lee et al., 2017; Zhan et al., 2018; Aguirre-Velarde et al., 2019; 松田ほか, 2021; Liu et al., 2023; 仙北屋, 2024 など)、冬季における貧酸素水塊については表層の結氷時のものが多い(蔵田, 2000; 辻・鈴木, 2021 など)。そのため、冬季に二枚貝の大量死が発生しても貧酸素水塊が原因とは考えられず、原因の一つの可能性として言及される程度であった(近藤ほか, 2012)。結氷以外で、冬季に貧酸素水塊が養殖に被害を及ぼす機構を示したことで、今後、他海域で同様の被害が発生した場合、原因の一つとして貧酸素水塊が考慮されるであろう。

また、本研究の成果により、閉鎖性海域(久美浜湾)での持続的な二枚貝養殖に向けたいくつかの提言が可能となった。一つ目は、貧酸素による被害の防止策、二つ目は、餌料環境改善策、三つ目は、海域の総合的な栄養塩管理についてである。以下にそれぞれの詳細を示す。

6.2. 冬季の貧酸素被害防止策の検討

本研究により、久美浜湾における貧酸素水塊が季節的な挙動を繰り返す機構が明らかになった(Fig. 3-6)。夏季には、他の多くの海域と同様、水温成層により下層の水塊が孤立し、貧酸素化した。この貧酸素水塊は非常に安定的であり、6月ごろから9月ごろにかけて常に下層にあり、風の影響で上昇することもほぼないと考えられる。

例えば、風による混合のしやすさの指標としてウェダバーン数 W があり、1 以下になると混合が起こりやすいとされる(環境省, 2014)。しかし、久美浜湾の場合、夏季の上層と下層の温度差は 15°C 以上あり、密度差も 10 kgm^{-3} 以上ある。上下層の密度差を 10 kgm^{-3} としても、 $W=1$ となる最大風速は約 45 ms^{-1} 以上となり、台風による暴風でも混合する可能性は極めて低い。そのため、夏季には、養殖深度を貧酸素水塊上端よりも浅く設定することで貧酸素水塊の被害を防止することができる。これは、現在、経験的に漁業者が実施している5 m 以浅という養殖深度が被害防止の観点で正しいことを示している。

一方、冬季には、他の多くの海域で鉛直混合により貧酸素水塊が解消するのに対して(藤原, 2014)、久美浜湾では、気候的な特徴により鉛直混合が発生しないことが明らかとなった(Fig. 3-2)。それだけではなく、毎年1月ごろ、5 m 以浅の養殖漁場に貧酸素水塊が到来することが明らかとなった。その機構は、湾外水と湾内水の密度の相対的な関係により、湾口から流入する湾外水が湾内下層に進入し、下層に存在した貧酸素水塊を中層へと押し上げることである(Fig. 3-6)。そのため、養殖被害を防止するためには、湾外水の進入深度が重要となる。本研究成果を元に、2024年10月に、1時間に1回の頻度で自動鉛直観測を実施する装置(以下、自動観測装置)を養殖筏に設置した。これにより、湾内の密度の鉛直的な分布がリアルタイムで把握できる。湾外である日本海の密度は、リアルタイムでの観測値はないものの、(国研)水産教育・研究機構のFRA-ROMS(Kuroda et al., 2017)、気象庁のJPNシステム(Tsujino et al., 2017)、九州大学のDREAMS(Hirose et al., 2017)、などが使用可能である。これにより、湾外水の湾内への進入深度が底層に達するタイミングがおおよそ予測でき、その時期以降は養殖深度を現在の垂下深度である4 mよりも浅くすることで対応可能である。河川水により、極めて低水温・低塩分となる深度2 m以浅を避け、あらかじめ深度約3 mに垂下しておくことで、貧酸素水塊到来の詳細なタイミングが分からずとも、被害は軽減できる。実際に、この対策を取ったことで、2024年1月の貧酸素による被害の大部分を防止できた。今後は、本研究の成果を元に物理モデルを開発することで、さらに詳細な貧酸素水塊の上昇のタイミングや上昇深度を予測することが可能となり、被害防止がより確実なものとなるであろう。

6.3. 餌料環境改善策の検討

6.3.1. 冬季から春季の深度調節

久美浜湾では、クロロフィルは極めて明確な層状に分布し、その極大層の深度は一定の季節変動を示すことが明らかになった(Fig. 4-6)。そのため、水柱のクロロフィル濃度が非常に高い場合でも、わずか0.5-1 mの深度差で養殖深度におけるクロロフィルがほとんどない状況が発生していた。裏を返せば、わずかな深度調整で養

殖二枚貝の餌料環境の大幅な改善が見込める可能性がある。

夏季は貧酸素水塊直上にクロロフィル極大ができるため、現状で二枚貝養殖に有効利用することには高いリスクが伴う。しかし、新たに設置した自動観測装置によってリアルタイムでクロロフィル濃度およびD0の鉛直分布を把握し、その情報を元に自動で深度調整することができれば、高い生産性を有効活用できる。

冬季から春季にかけては、クロロフィル極大層の深度に合わせて養殖深度を深くしていくことで、比較的小さいリスクで餌料環境の改善が実現する可能性がある。これまで、久美浜の漁業者は貧酸素水塊との位置関係から、養殖に使用可能な深度帯は1年を通して、深度5m以浅のみと考えられてきた。しかし、第3章で明らかにしたように、2月から5月頃にかけて、養殖漁場における貧酸素水塊の心配はほとんどないと考えられる。そのため、この時期に限って、二枚貝の育成に適した深度を比較的自由に選択することができることが明らかになった。クロロフィル極大層の深度変化とおおよその時期の対応は第4章で示したため、それに合わせて手で深度調整することで、養殖二枚貝の餌料環境が改善できる可能性がある。今後は、自動観測装置のデータを利用することで、より適切な深度調整が可能となる。

ただし、本項で述べた餌料環境はあくまでクロロフィル濃度のみに着目したものであり、第4章で課題として述べたように、クロロフィル濃度として表れるプランクトンの種組成、クロロフィル濃度として表れない底生珪藻や付着珪藻、デトリタスなどの餌としての重要性、養殖深度における流速や水温と摂餌の関係などについては、今後明らかにしていく必要がある。

6.3.2. 二枚貝養殖におけるDX

(Digital Transformation) の可能性

前項の深度調整はDXと親和性が高い。水産業の分野では現場が海上にあることが多く、電波が届きにくい、デジタル機器が海水に晒される、電源が必要であるなどの障害があり、農業などに比べてDXは遅れている(宮本, 2019)。世界の二枚貝養殖でも、近年、水質などのリアルタイムでのモニタリングが普及しつつあるが(Zhanget al., 2021; UbinaandCheng, 2022; Luetal., 2022; 和田ほか, 2022など)、最適な垂下深度への自動調整の事例は見当たらない。ただ、フランスにおけるマガキ養殖では、干出を目的として、ソーラー発電を使用した電動による垂下ロープの巻上げが実際に使用されている(<https://www.tarbouriech.fr/huitre/>, 2024/10/1 確認)。リアルタイムの水質情報と電動巻上げ技術を組み合わせれば、本研究で得られた成果を元に、常に適切な深度への自動調整が可能になるであろう。常に最適な深度に自動調整を行う養殖は、二枚貝養殖におけるDXの最先端の事例となるであろう。

6.4. 閉鎖性海域における持続的な養殖に向けた提言

久美浜湾では、窒素の負荷量は年々減少し、それに伴い湾内上層の窒素濃度も顕著に減少していた。その値は環境基準(環境省水域類型II)を下回っており、すでに上層の水質は改善したと言える。夏季の下層には依然として貧酸素水塊が形成されるが、貧酸素水塊中の窒素濃度は年々減少していることを、冬季の湾奥下層の窒素濃度の減少により示した(Fig. 5-9(b))。貧酸素水塊中の栄養塩は、夏季の中層クロロフィル極大の形成や、春季の植物プランクトンのブルームに利用される(Fig. 4-6(c), Fig. 5-10(c))。貧酸素水塊中の栄養塩が減少すれば、これらの一次生産も減少し、海域の生産性は低下すると考えられる。このような変化は、現在の二枚貝資源の減少や養殖二枚貝の育成不良の原因の一つになり得る。

歴史的に、世界中の閉鎖性海域や汽水湖では、人為的な負荷量の増大が富栄養化による貧酸素水塊や赤潮などの問題を引き起こし(Rabalaisetal., 2002; Chenetal., 2007; Wei et al., 2007; Conley et al., 2009; Rabalais et al., 2010; Wurtsbaugh et al., 2019 など)、この問題に対処するため、今度は負荷量の削減に取り組んできた(Riemann et al., 2016; McCrackin et al., 2017; Oviatt et al., 2017 など)。ところが、負荷量の削減はこれらの問題を完全に解決することなく、漁獲量の減少や有害藻類の出現などの別の新たな問題を引き起こす可能性があることが次第に明らかになってきた(Philippart et al., 2007; Duarte, 2009; Conley et al., 2009 など)。日本国内でも、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海など、各地で富栄養化による問題が発生している(石井ほか, 2008; 藤原, 2014b; 脇田ほか, 2014; 蒲原ほか, 2018; 芝ほか, 2020 など)。本研究で明らかにしたように、日本で最も閉鎖的な海域である久美浜湾で同様の問題が発生しているという事実は、いまだに富栄養化であると考えられている国内のどの海域でも同様の問題が起こりうることを示している。

本研究で得られた成果は、久美浜湾における循環型の持続的な二枚貝養殖に向けた一助となるであろう。具体的には、湾内の栄養塩循環を再現する低次生態系モデルを作成することができれば、底層からの栄養塩供給が枯渇するまでの年数が推定できる。このようなモデルを用いれば、堆積物がない状態での河川からの適切な栄養塩供給量も推定できるであろう。観測結果から、久美浜湾では春季ブルームに、夏季に下層の貧酸素水塊内に蓄積していた栄養塩が利用されていることが示唆されている。夏季の上層における一次生産量を適切に調整することは、一年を通じた安定的な一次生産に繋がると考えられる。このことは、良好な水質の保持と高い生産性を両立した持続的な二枚貝養殖の実現に貢献するであろう。DXと適切な栄養塩管理を実現できれば、久美浜湾が二枚貝養殖のモデル地域となると考えられる。

謝 辞

初めに、本研究を実施する機会を与えてくださり、常に温かい指導を賜った京都大学フィールド科学教育研究センター、大学院農学研究科 教授 三田村啓理博士、ならびに同 准教授 市川光太郎博士、京都大学フィールド科学教育研究センター 教授 益田玲爾博士に深く感謝いたします。また、京都大学大学院農学研究科 海洋生物環境学分野の先生方および研究室の皆さまには、様々な機会に研究に対する有益な助言を頂きました。担当教員である京都大学フィールド科学教育研究センター、大学院農学研究科 助教 小林志保博士には、分析や論文執筆などの研究全体にわたる丁寧な指導と、本稿の校閲を賜りました。深くお礼申し上げます。

湊とり貝組合の村岡克大氏、組合長富川泰成氏、村岡弘隆氏、豊浦貴治氏には久美浜湾における現地調査において、欠かすことのできない協力を頂きました。深く感謝申し上げます。また、学業および現地調査にご理解頂き、時には同行して頂いた京都府海洋センター農林水産技術センター海洋センターの皆さまにお礼申し上げます。

兵庫県環境研究センター 鈴木元治博士、兵庫県漁業協同組合連合会のり研究所 の川崎周作所長、小笠原真主任をはじめとした皆さま、いであ株式会社大阪支社環境化学部 部長 阿部浩司氏、同 技師の笠井彩可氏をはじめとした皆さまには、栄養塩および水質の測定に関して、快く相談に乗っていただき、ご助力を賜りました。誠にありがとうございました。

最後に、本研究を始めるきっかけを与えてくださり、終始、的確な助言と指導により研究を導いてくださった、京都大学名誉教授 藤原建紀博士に心より感謝いたします。長期間にわたる学業への理解と支援を頂いた家族に深く感謝いたします。

《引用文献》

- 阿保勝之, 杜多 哲, 藤原建紀, 武内智行 (1998) 五ヶ所湾における中層貧酸素水塊の発生と予測. 海岸工学論文集, 45, 971-975.
- Aguirre-Velarde A., Thouzeau G., Jean F., Mendo J., Cueto-Vega R., Kawazo-Delgado M., Vásquez-Spencer J., Herrera-Sanchez D., Vega-Espinoza A., Flye-Sainte-Marie J. (2019) Chronic and severe hypoxic conditions in Paracas Bay, Pisco, Peru: Consequences on scallop growth, reproduction, and survival. *Aquaculture*, 512, 734259.
- 青山裕晃, 甲斐正信, 鈴木輝明, 中尾 徹, 今尾和正 (1999) 三河湾における貧酸素化によるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) の死亡率の定式化II. 海洋理工学会誌, 5, 31-36.
- 有田正光, 池田裕一, 中井正則, 中村由行, 道奥康治, 村上和男 (1998) 水圏の環境, pp404, 東京電機大学出版局, 東京.
- 朝岡良浩, 小南裕志, 竹内由香里, 大丸裕武, 田中信行 (2007) 衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性. 水文・水資源学会誌, 20(6), 519-529.
- Boynton W. R., Ceballos M. A. C., Bailey E. M., Hodgkins C. L. S., Humphrey J. L., Testa J. M. (2017) Oxygen and nutrient exchanges at the sediment-water interface: a global synthesis and critique of estuarine and coastal data. *Estuaries Coasts*, 41, 301-333.
- Bricker S. B., Ferreira J. G., Zhu C. J., Rose M., Galimany E., Wikfors G., Saurel C., Miller R. L., Wands J., Trowbridge P., Grizzle R., Wellman K., Rheault R., Steinberg J., Jacob A., Davenport E. D., Ayvazian S., Chintala M., Tedesco M. A. (2018) Role of shellfish aquaculture in the reduction of eutrophication in an urban estuary. *Environ. Sci. Technol.*, 52(1), 173-183.
- Brown Z. W., Lowry K. E., Palmer M. A., van Dijken G. I., Mills M. M., Pickart R. S., Arrigo K. R. (2015) Characterizing the subsurface chlorophyll a maximum in the Chukchi Sea and Canada Basin. *Deep Sea Res. II*, 118, 88-104.
- Carmack C., Macdonald R. W., Jasper S. (2004) Phytoplankton productivity on the Canadian Shelf of the Beaufort Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 277, 37-50.
- Chen C. C., Gong G. C., Shiah F. K. (2007) Hypoxia in the East China Sea: one of the largest coastal low-oxygen areas in the world. *Mar.*

- Environ. Res., 64, 399-408.
- Chen Y., Zhao H. (2021) Spatial distribution of the summer subsurface chlorophyll maximum in the North South China Sea. *PLoS One*, 16(4), e0248715.
- 知北和久, 福山龍次, 坂本博明, 中路晃平(1997) 閉鎖性汽水湖における死水の挙動特性: 釧路市・春採湖での結氷期観測から. *北大地球物理学研報*, 60, 13-28.
- Conley D. J., Bjorck S., Bonsdorff E., Carstensen J., Destouni G., Gustafsson B. G., Heitanen S., Kortekaas M., Kuosa H., Meier H. E. M., Müller-Karulis B., Nordberg K., Norkko A., Nürnberg G., Pitkänen H., Rabalais N. N., Rosenberg R., Savchuk O. P., Slomp C. P., Voss M., Wulff F., Zillén L. (2009) Hypoxia-related processes in the Baltic Sea. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 3412-3420.
- Conley D. J., Paerl H. W., Howarth R. W., Boesch D. F., Seitzinger S. P., Havens K. E., Likens G. E. (2009) Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 323(5917), 1014-1015.
- Cornell S., Randell A., Jickells T. (1995) Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the oceans. *Nature*, 376, 243-246.
- Driscoll, C. T., Driscoll K. M., Roy K. M., Mitchell M. J. (2003) Chemical response of lakes in the Adirondack region of New York to declines in acidic deposition. *Environ. Sci. Technol.*, 37(10), 2036-2042.
- Duarte C. M. (2009) Coastal eutrophication research: a new awareness. *Hydrobiologia*, 629, 263-269.
- 藤原建紀(1999) 伊勢湾の流れと水質・生態系のしくみ. 海のサイエンスと情報II—海洋情報シンポジウムから—, 日本水路協会海洋情報研究センター, 11-22.
- 藤原建紀(2014a) 貧酸素水塊の形成と挙動. 詳論沿岸海洋学(日本海洋学会 沿岸海洋研究会編), 171-189, 恒星社厚生閣, 東京.
- 藤原建紀(2014b) 内湾の貧栄養化—窒素・リン負荷量削減が海域の COD, 栄養塩レベルにおよぼす影響. *沿岸海洋研究*, 52(1), 11-27.
- 藤原建紀, 福井真吾, 笠井亮秀, 坂本 亘, 杉山陽一(1997) 伊勢湾の栄養塩輸送と亜表層クロロフィル極大. *海と空*, 73, 55-61.
- 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: アサリおよび生物付着板を用いた現地調査. *水環境学会誌*, 43(6), 175-182.
- 藤原建紀, 加地智彦, 鈴木元治(2024) 東京湾における CO₂ および O₂ 海面フラックスの長期リアルタイム・モニタリング: 気候変動に対応できる沿岸環境・生態系モデルの基礎として. *水環境学会誌*, 47(4), 113-128.
- 藤原建紀, 高橋鉄哉, 山田佳昭, 兼子昭夫(2000) 東京湾の貧酸素水塊に外洋の海況変動が及ぼす影響. *海の研究*, 9(6), 303-313.
- Fujiwara T., Yamada Y. (2002) Inflow of oceanic water into Tokyo Bay and generation of a subsurface hypoxic water mass. *J. Geophys. Res.*, 107(C5), 13-1-13-9.
- 藤井智康, 藤原建紀, 鞘師弘一, 湯浅楠勝, 野田 巖, 小野 健, 石川泰助(2015) 沿岸海域における窪地の貧酸素水塊の消滅過程. *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 71(2), 1285-1290.
- 古川博一, 河村賢二, 原 稔明, 木戸研太郎, 福壽真也(2007) 琵琶湖深層部への溶存酸素供給に関する基礎的考察. *土木学会論文集 B*, 63(2), 144-153.
- Garside C., Garside J. C. (2004) Nutrient Sources and Distributions in Cobscook Bay. *Northeast. Nat.*, 11, 75-86.
- 原 素之, 奥村 裕, 伊藤絹子, 金子健司, 笕 茂徳, 横山 寿(2018) 宮城県長面浦における持続的なカキ養殖生産のための環境調査. *日水誌*, 84(6), 1054-1057.
- 長谷川夏樹, 日向野純也, 藤岡義三, 石樋由香, 水野知巳, 森田和英, 山口 恵, 今井芳多賀, 浅尾大輔, 尾崎善信, 山本善幸(2015) アサリ垂下養殖における基質の検討. *水産増殖*, 63(1), 9-16.
- 長谷川拓也, 宮川泰輝, 服部宏勇, 松井紀子(2022) 三河湾における貧酸素水塊とトリガイ資源の動態. *水産海洋研究*, 86(3), 97-109.
- 比嘉紘士, 鯉淵幸生, 小林 拓, 虎谷充浩, 作野裕司(2015) 夏季と冬季における東京湾のクロロフィル a 分布の形成パターンの分類. *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 71(2), 1_1303-1_1308.
- 日向野純也(2024) 貝類資源を見直す—沿岸漁業活性化の切り札. *水産振興オンライン*, <https://lib.suisan-shinkou.or.jp/column/suisan-shigen/vol08.html> (2024年10月時点).
- Hirose N., Kumaki Y., Kaneda A., Ayukawa K., Oke N., Ikeda S., Igeta Y., Watanabe T. (2017) Numerical simulation of the abrupt occurrence of strong current in the southeastern Japan Sea. *Cont. Shelf Res.*, 143, 194-205.
- Holm-Hansen O., Lorenzen, C. J., Holmes, R. W.,

- St. rickland, J. D. H. (1965) Fluorometric determination of chlorophyll. ICES J. Mar. Sci., 30(1), 3-15.
- Horne A. J., Goldman C. R. (1994) Limnology, pp480, McGraw-Hill, New York.
- Humphries A. T., Ayvazian, S. G., Carey J. C., Hancock B. T., Grabbert S., Cobb D., Strobel C. J., Fulweiler R. W. (2016) Directly measured denitrification reveals oyster aquaculture and restored oyster reefs remove nitrogen at comparable high rates. Front. Mar. Sci., 3, 74.
- Ichimi K., Honda M., Okada Y., Tsuzuki K., Yamaguchi H. (2019) Importance of shingle beaches as habitat for Manila clam *Ruditapes philippinarum*. Fish. Sci., 85, 417-427.
- 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.
- 乾 政秀 (2013) 日本のカキ養殖・百科. 水産振興, 544, 1-120.
- 金子健司, 奥村 裕, 原 素之 (2019) 宮城県長面浦における栄養塩の供給経路と高濃度のクロロフィル a の維持機構. 水産海洋研究, 83(3), 171-180.
- 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.
- 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.
- 環境省 (2014) 日本の汽水湖～汽水湖の水環境の現状と保全～. URL: <https://www.env.go.jp/content/900542728.pdf> (2024年10月時点).
- 環境庁水質保全局, 水産庁研究開発部 (1977) 瀬戸内海中央部における貧酸素底層水形成機構等の解明に関する総合報告書.
- Kasai A., Fujiwara T., Kimura T., Yamada H. (2004) Fortnightly Shifts of Intrusion Depth of Oceanic Water into Ise Bay. J. Oceanogr., 60, 817-824.
- Kasai A., Yamada T., Takeda H. (2007) Flow structure and hypoxia in Hiuchi-nada, Seto Inland Sea, Japan. Estuar. Coast. Shelf Sci., 71(1-2), 210-217.
- 柏井 誠 (1989) 久美浜湾における無酸素水塊解消の試み. 沿岸海洋研究ノート, 26, 129-140.
- Kaste, Ø., Skjelkvåle B. L. (2002) Nitrogen dynamics in runoff from two small heathland catchments representing opposite extremes with respect to climate and N deposition in Norway. HESS, 6, 351-362.
- Kellogg M. L., Cornwell J. C., Owens M. S., Paynter K. T. (2013) Denitrification and nutrient assimilation on a restored oyster reef. Mar. Ecol. Prog. Ser., 480, 1-19.
- Kodama K., Horiguchi T. (2011) Effects of hypoxia on benthic organisms in Tokyo Bay, Japan: A review. Mar. Pollut. Bull., 63, 215-220.
- Kodama T., Igeta Y., Kuga M., Abe S. (2016) Long-term decrease in phosphate concentrations in the surface layer of the southern Japan Sea. J. Geophys. Res. Oceans, 121(10), 7845-7856.
- 古賀佑太郎, 鈴木元治, ピントスヴァレンティナ (2022) 出水時の加古川・揖保川流域における栄養塩負荷量特性の把握. 水文・水資源学会誌, 35(1), 32-40.
- 小池裕子, 斎藤 徹, 小杉正人, 柿野 純 (1992) 東京湾小櫃川河口干潟におけるアサリの食性と貝殻成長. 水産工学, 29, 105-112.
- 国際エメックスセンター(2001) 日本の閉鎖性海域(88 海域) 環境ガイドブック. 国際エメックスセンター, 神戸.
- 近藤伸一, 中尾令子, 岩滝光儀, 坂本節子, 板倉 茂, 松山幸彦, 長崎慶三 (2012) 有害赤潮藻ヘテロコブサの分布域北上現象-佐渡島加茂湖での赤潮によるマガキの大量死-. 日水誌, 78(4), 719-725.
- 近藤智子, 濱田浩美 (2011) 群馬県赤城山大沼における湖沼学的研究. 千葉大教育研究紀要, 59, 319-332.
- Kozuki Y., Yamanaka R., Matsushige M., Saitoh A., Otani S., Ishida T. (2013) The after-effects of hypoxia exposure on the clam *Ruditapes philippinarum* in Omaehama beach, Japan. Estuar. Coast. Shelf Sci., 116, 50-56.
- Kubo A., Maeda Y., Kanda J. (2017) A significant net sink for CO2 in Tokyo Bay. Sci. Rep., 7, 44355.
- Kuroda H., Setou T., Kakehi S., Ito S., Taneda T., Azumaya T., Inagake D., Hiroe Y., Morinaga K., Okazaki M., Yokota T., Okunishi T., Aoki K., Shimizu Y., Hasegawa D., Watanabe T. (2017) Recent Advances in Japanese Fisheries Science in the Kuroshio-Oyashio Region through Development of the FRA-ROMS Ocean Forecast System: Overview of the Reproducibility of Reanalysis Products, Open J. Mar. Sci., 7, 62-90.
- 蔵田 護 (2000) 低水温下におけるアサリの低塩分・貧酸素耐性. 北海道水試研報, 58, 17-21.
- 楠木 豊 (1997) マガキの成育とクロロフィル a 量との関係.

- 広島水試研報, 9, 28-36.
- 京都府立海洋センター (2004) トリガイ養殖-III 新しいトリガイ養殖作業マニュアル. 季報, 79, 1-18.
- 京都府農林水産技術センター海洋センター (2013) アサリとアマモを用いた阿蘇海の環境改善. 季報, 105, 1-16.
- Lalli C. M., Parsons T. R. (1995) Biological Oceanography: An Introduction. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Lee S. J., Jo Q., Han J. C., Park Y. C., Park T. G. (2017) Pelagic oxycline and damage potential of hypoxia to the Pacific oyster *Crassostrea gigas* suspended in longline aquaculture systems. *Aquac. Environ. Interact.*, 9, 461-468.
- Lu H. Y., Cheng C. Y., Cheng S. C., Cheng Y. H., Lo W. C., Jiang W. L., Nan F. H., Chang S. H., Ubina N. A. (2022) A low-cost AI buoy system for monitoring water quality at offshore aquaculture cages. *Sensors*, 22(11), 4078.
- Liu Y., Ren J. S., Wang X., Wu W., Zhang J. (2023) Environmental influence on summer survival of Manila Clam *Ruditapes philippinarum*: A case study in an aquaculture bay. *Mar. Environ. Res.*, 192, 106242.
- Magni P., Montani S. (2000) Water chemistry variability in the lower intertidal zone of an estuary in the Seto Inland Sea, Japan: seasonal patterns of nutrients and particulate compounds. *Hydrobiologia*, 432, 9-23.
- Masanja F., Yang K., Xu Y., He G., Liu X., Xu X., Xiaoyan J., Xin L., Mkuye R., Deng Y., Zhao L. (2023) Impacts of marine heat extremes on bivalves. *Front. Mar. Sci.*, 10, 1159261.
- 増田恵一, 杉野雅彦 (2006) 兵庫県相生養殖漁場における漁場環境とマガキの成育. 兵庫農技総七研報(水産), 39, 17-22.
- 松田正彦, 品川 明, 日向野純也, 平野慶二, 藤井明彦, 石松 惇 (2021) 養殖漁場における貧酸素時のアサリ外套腔液有機酸含量の挙動. 水産増殖, 69(1), 1-11.
- 松田義弘 (1999) 浜名湖水のふしぎ—内湾の自然と海水の動き—. pp155, 静岡新聞社, 静岡.
- 松井繁明 (2011) マガキ養殖漁場の水質について. 福岡水技七研報, 21, 87-93.
- 松野 進, 木村 博 (2002) 山口県大島郡北部海域におけるトリガイの生態と資源管理に関する研究 (5): トリガイの高水温耐性および低酸素耐性. 山口水研七研報, 1, 23-29.
- McCrackin M. L., Jones H. P., Jones P. C., Moreno-Mateos D. (2017) Recovery of lakes and coastal marine ecosystems from eutrophication: a global meta-analysis. *Limnol. Oceanogr.*, 62(2), 507-518.
- Mino Y., Sukigara C., Ishizaka J. (2023) Enhanced oxygen consumption results in summertime hypoxia in Mikawa Bay, Japan. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30, 26120-26136.
- 宮本佳則 (2019) 漁業における ICT の可能性. 水産振興, 東京, (財) 東京水産振興会.
- 宮元 誠, 鞆 憲弘, 中尾兼治, 右田裕二, 山田正人 (2016) 池田湖の全層循環後の水質について. 鹿児島環境セ報, 17, 101-104.
- 森脇晋平, 大北晋也 (2003) 中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特性と海洋構造. LAGUNA(汽水域研究), 10, 27-34.
- Mulholland P. J., Hill W. R. (1997) Seasonal patterns in streamwater nutrient and dissolved organic carbon concentrations: Separating catchment flow path and in stream effects. *Water Resour. Res.*, 33, 1297-1306.
- Murdoch P. S., Stoddard J. L. (1993) Chemical characteristics and temporal trends in eight streams of the Catskill Mountains, New York. *Water, Air, Soil Pollut.*, 67, 367-395.
- 日本水産資源保護協会 (2018) 水産用水基準第 8 版. 公益社団法人日本水産資源保護協会, 東京.
- 中村由行, 井上徹教, 足立義彦, 石飛 裕, 嘉藤健二, 山室真澄 (1999) 汽水湖沼における底層水質の急変現象と溶出の非定常過程. 海岸工学論文集, 46, 1031-1035.
- Nakanishi M., Sekino T., Kimoto T., Tsuda R., Kumagai M. (1999) A Hypothesis on Formation of the Subsurface Chlorophyll Maximum Observed in Lake Biwa in September of 1994. *Jpn. J. Limnol.*, 60(2), 125-137.
- Nishikawa T., Harada K., Watanabe T. (2022) Seasonal and annual dynamics of phytoplankton off Tajima, southwestern Sea of Japan. *Plankton Benthos Res.*, 17(1), 83-90.
- Nishikawa T., Hori Y., Nagai S., Miyahara K., Nakamura Y., Harada K., Tanda M., Manabe T., Tada K. (2010) Nutrient and Phytoplankton Dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35-Year Period from 1973 to 2007. *Estuaries Coasts*, 33, 417-427.
- 長浜達章, 川村芳浩, 魚住香織, 杉野雅彦 (2005) 魚類種苗生産試験 (養殖カキの摂餌と成長に関する飼育試験. 平成 15 年度兵庫農技総七研報(水産編),

- 19.
- Nagasoe S., Hisada T., Nishitani G., Takeuchi H., Sakiyama K. (2019) Phytoplankton uptake and growth rate in the Japanese egg cockle *Fulvia mutica*. *Int. Aquat. Res.*, 11, 359-375.
- 野上和彦, 梅沢 敏, 阪口清次, 福原 修(1981) トリガイ *Fulvia mutica* (REEVE) の酸素消費量と高水温期におけるへい死との関係について. *南西水研研報*, 13, 19-28.
- 沼口勝之(2001) アサリ漁場の餌料環境としてのセジメント. *水産工学*, 37, 209-215.
- Oviatt C., Smith L., Krumholz J., Coupland C., Stoffel H., Keller A., McManus M. C., Reed L. (2017) Managed nutrient reduction impacts on nutrient concentrations, water clarity, primary production, and hypoxia in a north temperate estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 199, 25-34.
- 小川真由美, 野上道男(1994) 冬季の降水形態の判別と降水量の分離. *水文・水資源学会誌*, 7(1), 421-427.
- Park S., Kim G., Kwon H. K., Han I. S. (2023) Long-term changes in the concentrations of nutrients in the marginal seas (Yellow Sea, East China Sea, and East/Japan Sea) neighboring the Korean Peninsula. *Mar. pollut. Bull.*, 192, 115012.
- Percuoco V. P., Kalnejais L. H., Officer L. V. (2015) Nutrient release from the sediments of the Great Bay Estuary, N.H. USA. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 161, 76-87.
- Philippart C. J. M., Beukema J. J., Cadee G. C., Dekker R., Goedhart P. W., Iperen J. M. van, Leopold M. F., Hermen P. M. J. (2007) Impacts of nutrient reduction on coastal communities. *Ecosystems*, 10, 95-118.
- Rabalais N. N., Turner R. E., Wiseman W. J. (2002) Gulf of Mexico hypoxia, aka "the dead zone". *Annu. Rev. Ecol. Evol. S.*, 33, 235-263.
- Rabalais N. N., Diaz R. J., Levin L. A., Turner R. E., Gilbert D., Zhang J. (2010) Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. *Biogeosciences*, 7(2), 29 585-619.
- Riemann B., Carstensen J., Dahl K., Fossing H., Hansen J. W., Jakobsen H. H., Josefson A. B., Krause-Jensen D., Markager S., Støhr P. A. (2016) Recovery of Danish coastal ecosystems after reductions in nutrient loading: a holistic ecosystem approach. *Estuaries Coasts.*, 39, 82-97.
- 佐々木 淳, 渡邊亮太, 磯部雅彦, 五明美智男(2001) 自動昇降式観測システムを用いた冬季の東京湾湾奥における基礎生産の推定. *海岸工学論文集*, 48, 1091-1095.
- Saurel C., Ferreira J. G., Cheney D., Suhrbier A., Dewey B., Davis J., Cordell J. (2014) Ecosystem goods and services from Manila clam culture in Puget Sound: a modelling analysis. *Aquacult. Environ. Interact.*, 5, 255-270.
- 仙北屋 圭(2024) 七尾湾における貧酸素の現状と養殖貝類への影響. *沿岸海洋研究*, 62(1), 51-53.
- 瀬戸雅文, 金子和恵, 新居久也(2004) 能取湖に形成される貧酸素水塊がホタテガイに及ぼす影響. *海洋開発論文集*, 20, 1049-1054.
- 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.
- Sickman J. O., Melack J. M. (1998) Nitrogen and sulfate export from high elevation catchments of the Sierra Nevada, California. *Water, Water, Air, Soil Pollut.*, 105, 217-226.
- 杉原幸樹, 中津川 誠(2013) 富栄養化した停滞性水域の結氷下の水質挙動と気候変動による影響. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 69(1), 44-59.
- 杉原幸樹, 新目竜一(2018) 2016年北海道豪雨時および2017年融雪期の網走湖における塩水挙動の現地観測. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 74(5), 499-504.
- 杉本 亮, 笠井亮秀, 山尾 理, 藤原建紀, 木村琢磨(2004) 伊勢湾における河川流量の変動に伴う懸濁態有機物の変化. *水産海洋研究*, 68(3), 142-150.
- 鈴木秀夫(1962) 日本の気候区分. *地理学評論*, 35, 205-211.
- 鈴木健吾, 清本節夫, 輿石裕一(2012) 断続的な貧酸素曝露がアサリの栄養状態および貧酸素耐性に与える影響. *水産技術*, 5, 39-47.
- 立川康人, 滝野晶平, 藤岡優子, 萬 和明, キムスンミン, 椎葉充晴(2011) 気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測. *土木学会論文集 B1(水工学)*, 67(1), 1-15.
- Taketani F., Aita M. N., Yamaji K., Sekiya T., Ikeda K., Sasaoka K., Hashioka T., Honda M. C., Matsumoto K., Kanaya Y. (2018) Seasonal Response of North Western Pacific Marine Ecosystems to Deposition of Atmospheric Inorganic Nitrogen Compounds from East Asia. *Sci. Rep.*, 8, 9324.

- Tan K., Zheng H. (2020) Ocean acidification and adaptive bivalve farming. *Sci. Total Environ.*, 701, 134794.
- 谷本尚史, 田中雅幸, 久田哲二, 大畑亮輔, 今西裕一 (2015) 低塩分がトリガイの生残に及ぼす影響. *京都海セ研報*, 37, 7-10.
- 谷本尚史 (2023) 高水温がトリガイの濾水速度に及ぼす影響 (短報). *京都海セ研報*, 45, 10-14.
- 鳥羽光晴 (2017) アサリ資源の減少に関する議論への再訪. *日水誌*, 83, 914-941.
- Toba M., Kosemura T., Yamakawa H., Sugiura Y., Kobayashi Y. (2008) Field and laboratory observations on the hypoxic impact on survival and distribution of short-necked clam *Ruditapes philippinarum* larvae in Tokyo Bay, central Japan. *Plankton Benthos Res.*, 3(3), 165-173.
- 徳田眞孝, 濱田弘之, 神菌真人, 江藤拓也 (1993) 豊前海における養殖カキの特性と環境要因との関係. *福岡水技研報*, 1, 155-163.
- 富川なす美 (2019) マガキの身入り向上試験について. *宮城水産研報*, 19, 41-44.
- Tong Y., Zhao Y., Zhen G., Chi J., Liu X., Lu Y., Wang X., Yao R., Chen J., Zhang W. (2015) Nutrient loads flowing into coastal waters from the main rivers of China (2006-2012). *Sci. Rep.*, 5, 16678.
- Tremblay J. É., Raimbault P., Garcia N., Lansard B., Babin M., Gagnon J. (2014) Impact of river discharge, upwelling and vertical mixing on the nutrient loading and productivity of the Canadian Beaufort Shelf. *Biogeosciences*, 11, 4853-4868.
- 辻 盛生, 鈴木正貴 (2021) 寒冷地の浅水富栄養化水域における水質の季節変動と結氷期の魚類斃死事故の要因解析. *水環境学会誌*, 44(5), 165-174.
- Tsujino H., Nakano H., Sakamoto K., Urakawa S., Hirabara M., Ishizaki H., Yamanaka G. (2017) Reference manual for the meteorological research institute community ocean model version 4. Technical Reports of the Meteorological Research Institute, 80, pp284.
- Ubina N. A., Cheng S. C. (2022) A review of unmanned system technologies with its application to aquaculture farm monitoring and management. *Drones*, 6, 12.
- 和田雅昭 (2022) スマート水産業入門. pp222, (株) 緑書房, 東京.
- 脇田和美, 山北剛久, 山田勝雅, 八木信行, 黒倉 壽 (2014) ノリ養殖海域としての東京湾の海域評価—複数機関のデータを活用した海域の類型化と水環境特性の検討—. *日水誌*, 80(5), 689-701.
- Wei H., He Y., Li Q., Liu Z., Wang H. (2007) Summer hypoxia adjacent to the Changjiang Estuary. *J. Marine Syst.*, 67, 292-303.
- Weston K., Fernand L., Mills D. K., Delahunty R., Brown J. (2005) Primary production in the deep chlorophyll maximum of the central North Sea. *J. Plankton Res.*, 27(9), 909-922.
- Williams M. W., Baron J. S., Caine N., Sommerfeld R., Sanford R. (1996) Nitrogen Saturation in the Rocky Mountains. *Environ. Sci. Technol.*, 30(2), 640-646.
- Withers P. J. A., Jarvie H. P. (2008) Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review. *Sci. Total Environ.*, 400, 379-395.
- Wurtsbaugh W. A., Paerl H. W., Dodds W. K. (2019) Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *Wiley Interdiscipl. Rev.*, 6(5), e1373.
- 山口創一, 速水祐一, 木元克則 (2015) カキ礁による有明海貧酸素水塊の抑制効果. *沿岸海洋研究*, 53(1), 25-38.
- 山本民次 (2007) ダム建設によるエスチュアリーへの貧栄養化と植物プランクトン相の変化. *日水誌*, 73(1), 80-84.
- 山中 勤, 脇山義史, 鈴木啓助 (2013) 中部山岳地域における融雪流出特性の標高依存性. *地学雑誌*, 122(4), 682-693.
- Zhang Q., Lan Y., Chen L., Yu X., Zhang L. (2021) Study of NB-IoT-based unmanned surface vehicle system for water quality monitoring of aquaculture ponds. *Proc. SPIE 11887, International Conference on Sensors and Instruments (ICSI 2021)*, 118871K.
- Zhang Y., Gao X., Guo W., Zhao J., Li Y. (2018) Origin and dynamics of dissolved organic matter in a mariculture area suffering from summertime hypoxia and acidification. *Front. Mar. Sci.*, 5, 325.

本研究に関する業績

《論文》

船越裕紀, 久田哲二, 藤原建紀 (2019) 久美浜湾における冬季の貧酸素化. 京都府農林水産技術センター海洋センター研究報告, 41, 9-12.

船越裕紀, 田中雅幸, 小林志保, 藤原建紀 (2023) 汽水湖(久美浜湾)における貧酸素水塊の解消過程—冬季の鉛直混合を阻害する淡水流入—. 水環境学会誌, 46, 173-180.

船越裕紀, 小林志保, 藤原建紀 (2025) 閉鎖性海域(久美浜湾)におけるクロロフィル極大層の季節変化—貧酸素水塊および降水との関係性—. 水産海洋研究, 89(1), 17-27.

Funakoshi Y., Kobayashi S., Fujiwara T. (2026) Prolonged cold-season phytoplankton blooms sustained by nutrient supply from hypoxic water masses in a brackish lake (Kumihama Bay, Kyoto, Japan). *Fish. Sci.*, 92, 165-178.

《受賞》

令和5年度 全国水産試験場長会 会長賞(全国水産試験場長会, 2023年11月)

2023年度 水産海洋研究発表大会 若手優秀講演賞(水産海洋学会, 2023年11月)

令和6年度 京都府優良職員表彰(京都府, 2024年6月)

