

# 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—

船 越 裕 紀<sup>1, 2), 1)</sup>

田 中 雅 幸<sup>1)</sup>  
藤 原 建 紀<sup>4, 5)</sup>

小 林 志 保<sup>3)</sup>

## Breakdown Process of Hypoxic Water Mass in Brackish Lake (Kumihama Bay, Kyoto) : Rainfall and Snowmelt Water Obstructing Vertical Mixing and Causing Hypoxic Water Mass to Remain in Winter

Yuki FUNAKOSHI<sup>1, 2), 1)</sup>, Masayuki TANAKA<sup>1)</sup>, Shihō KOBAYASHI<sup>3)</sup> and Tateki FUJIWARA<sup>4, 5)</sup>

<sup>1)</sup> Fisheries Technology Department; Kyoto Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Technology Center, Odakyukuno 1029-3, Miyazu, Kyoto 626-0052, Japan

<sup>2)</sup> Division of Applied Bioscience, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwake, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

<sup>3)</sup> Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwake, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

<sup>4)</sup> Emeritus Professor of Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8501, Japan

<sup>5)</sup> Osaka Branch Office, IDEA Consultants, Inc., Nanko-kita 1-24-22, Suminoe-ku, Osaka, Osaka 559-8519, Japan

### Abstract

In Kumihama Bay, Kyoto, which is a brackish lake, hypoxic water is known to damage aquacultural bivalve in winter; however, the dynamics of hypoxic water mass has not been elucidated. To clarify this dynamics, we observed the monthly spatial distributions of water temperature, salinity, and dissolved oxygen concentration. In the breakdown process of hypoxic water mass, a decrease in hypoxic water mass induced by the tidal intrusion of seawater from the bay mouth from December to March and river flow entrainment was observed. Although cooling vertical mixing is generally observed in winter in lakes and bays in a temperate zone, that was not observed in Kumihama Bay. In Kumihama Bay, a brackish lake located in the central Honshu Island (mainland Japan) along the Sea of Japan, watershed precipitation is high in winter, and rainfall and snowfall that melts in a few days immediately flow into the bay. This flow of fresh water causes strong salinity and density stratifications in the upper layer of the bay, obstructing the cooling vertical mixing. As a result, the hypoxic water mass formed in summer remained until winter. In winter, the seawater that intruded from the bay mouth lifted the bottom hypoxic water mass to the middle layer, and the hypoxic water reached the bivalve aquaculture fields.

**Keywords:** Brackish lake; Hypoxia; Year-round stratification; Bivalve aquaculture; Kumihama Bay

### 1. はじめに

汽水湖は、陸域からの有機物や栄養塩類等が流入するため、生産性が非常に高く、養殖を含めた漁業活動において重要な場であると同時に、底層の貧酸素化や富栄養化が大きな問題となっている<sup>1)</sup>。特に、底層の貧酸素水塊は、底生生物に影響を与えるほか、風などの外力により上層へ湧昇すると、生物や漁業に大きな被害を及ぼす<sup>1)</sup>。そのため、汽水湖における貧酸素水塊の詳細な挙動の解明が不可欠である。

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で解消することがよく知られている<sup>2)</sup>。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<sup>3~6)</sup>。

京都府京丹後市に位置する久美浜湾は、環境省の定める閉鎖性海域88海域の中で最も閉鎖度が高い閉鎖性海域として知られている<sup>7)</sup>。久美浜湾には、湾南部から川上谷川と久美谷川が、東部からは佐濃谷川が流入し、湾内の塩分は5~34であり、汽水湖となっている。湾口部は幅30 m、深さ5 mの水路でのみ日本海と繋がっている。湾内では二枚貝養殖が盛んであり、湾北部や湾中央部西岸においてマガキの垂下養殖が、湾北部でトリガイやアサリのコンテナ養殖が実施されている<sup>8)</sup>。これらの養殖漁

1) 京都府農林水産技術センター海洋センター 〒626-0052 京都府宮津市小田宿野 1029-3

2) 京都大学農学研究科 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

3) 京都大学フィールド科学教育研究センター 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

4) 京都大学名誉教授 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

5) いであ株式会社大阪支社 〒559-8519 大阪府大阪市住之江区南港北 1-24-22

¶ 連絡先: y-funakoshi58@pref.kyoto.lg.jp

場において、冬季に、貧酸素水塊によるものと思われる漁業被害がしばしば発生する。筆者らは、冬季の2016年1月に、久美浜湾で詳細な縦断および横断鉛直観測を実施した。これにより、夏季に底層で発達した貧酸素水塊が、冬季まで残存し、湾内底層への外海水の流入によって持ち上げられることによって、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事を示した<sup>8)</sup>。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。

本研究では、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、汽水湖での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検討した。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（以下、DO）の季節変動を解釈する上でも重要な意味を持つ。

## 2. 方法

### 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. 1b）。観測には、CTD（Aqua TROLL, 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 ( $\text{kg m}^{-3}$ ) を指す）を水温および塩分から算出した。

### 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OTT Hydromet 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. 1b）、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具合等により変動）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、観測は水深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。

### 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. 1a）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. 1a）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. 1a）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。

### 2.4 底層DOの季節変動（公共用水域水質測定）

底層DOの季節変動データとして、京都府公共用水域水質測定の久美浜湾奥部の定点（Fig. 1bのSt. 9に該当）

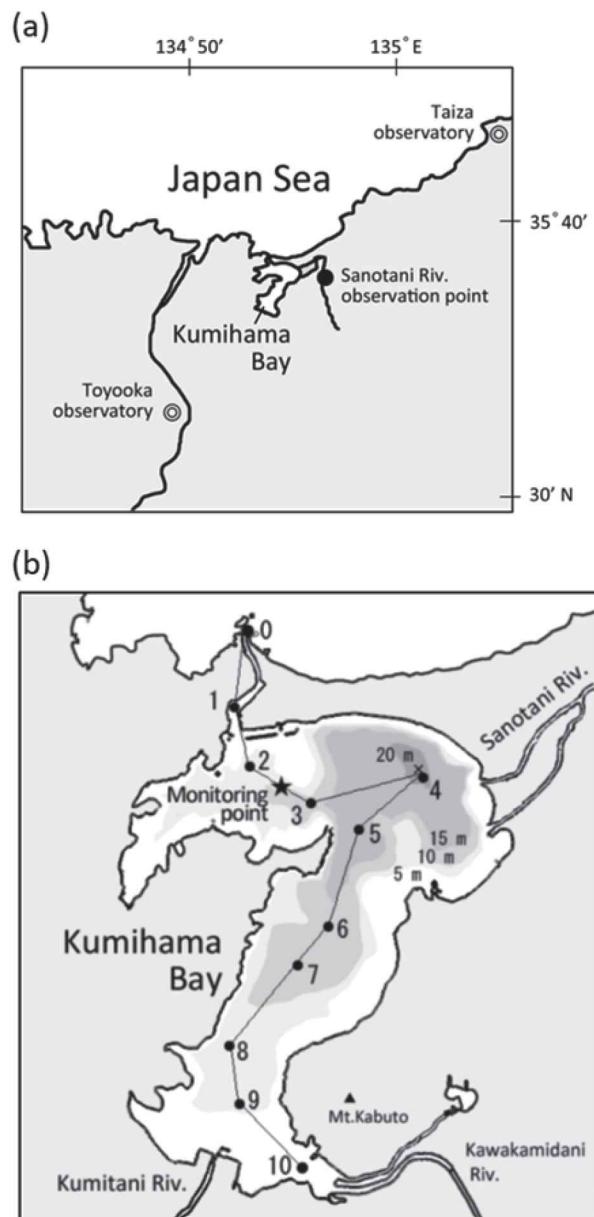


Fig. 1 Maps of study area.

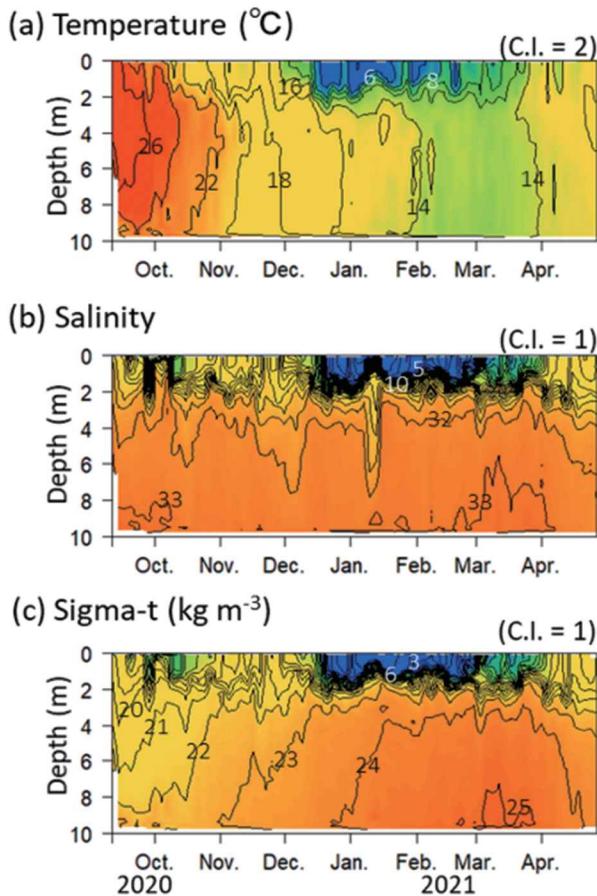
(a) Weather observation stations (double circles) and river flow observation point (solid circle). (b) Our observation stations. Circles, star and line show the hydro-cast stations, continuous monitoring point and the longitudinal transect, respectively.

における2012から2019年度の下層のDO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、必ずしも一定の水深ではない。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. 結果

### 3.1 自動観測結果と気象および河川流量

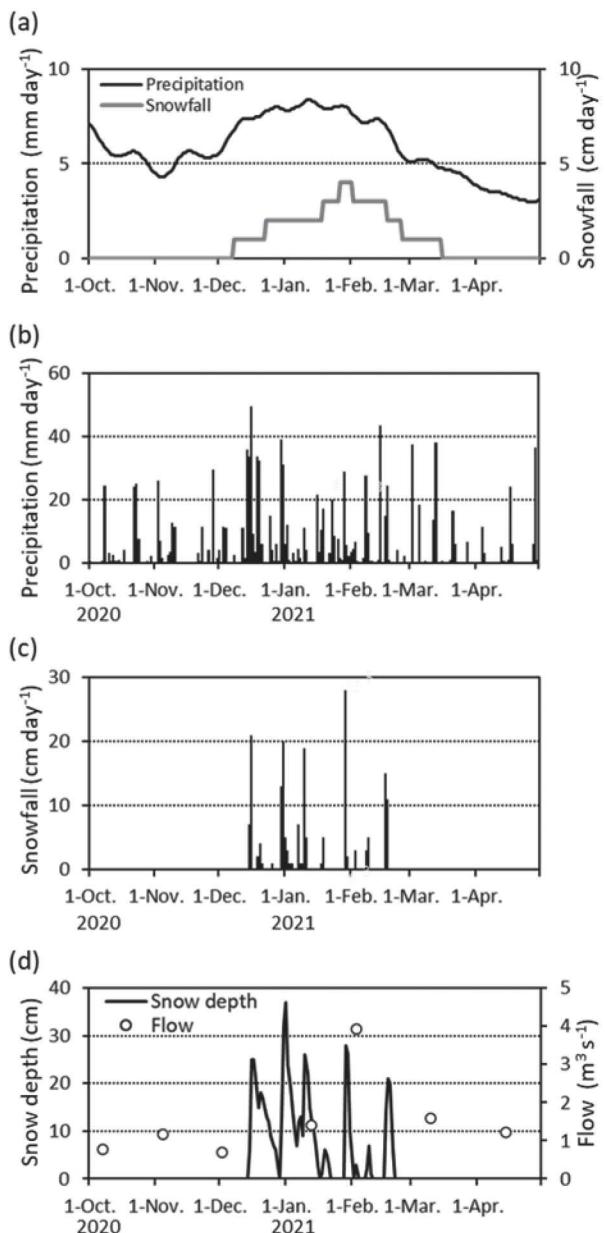
2020年9月から2021年4月における自動観測点の水温、塩分、密度の鉛直観測結果を時系列で示した（Fig. 2）。9月下旬までは上層から下層まで24 °C以上であったが、10月から11月にかけて上層から下層まで徐々に水温が低下し、12月には約18 °Cまで低下した。12月中旬から3月中旬ごろまで、表層2 mを、水温5-10 °C、塩分3-15、密度2-15の低温、低塩分、低密度の水塊が覆って



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

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0cmとなっており、積雪が長くて2週間程度、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 $3.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ が最も高く、次いで、3月10日の $1.59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、1月13日の $1.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。



**Fig. 3** (a) 30-year average daily precipitation ( $\text{mm day}^{-1}$ ) and snowfall ( $\text{cm day}^{-1}$ ) from October to April, and daily time series of (b) precipitation ( $\text{mm day}^{-1}$ ), (c) snowfall ( $\text{cm day}^{-1}$ ) 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 ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).

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 $13\text{-}22 \text{ m s}^{-1}$ であった。また、2021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 $9\text{-}23 \text{ m s}^{-1}$ であった。

### 3.2 縦断鉛直観測結果

#### 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. 4に示した。

11月の湾内中層の水温は $17\text{-}19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、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2m以浅は水温 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 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。この水塊の水温は、1月は6 °C以下、2月は2-8 °C、3月は8-13 °C

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 °C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

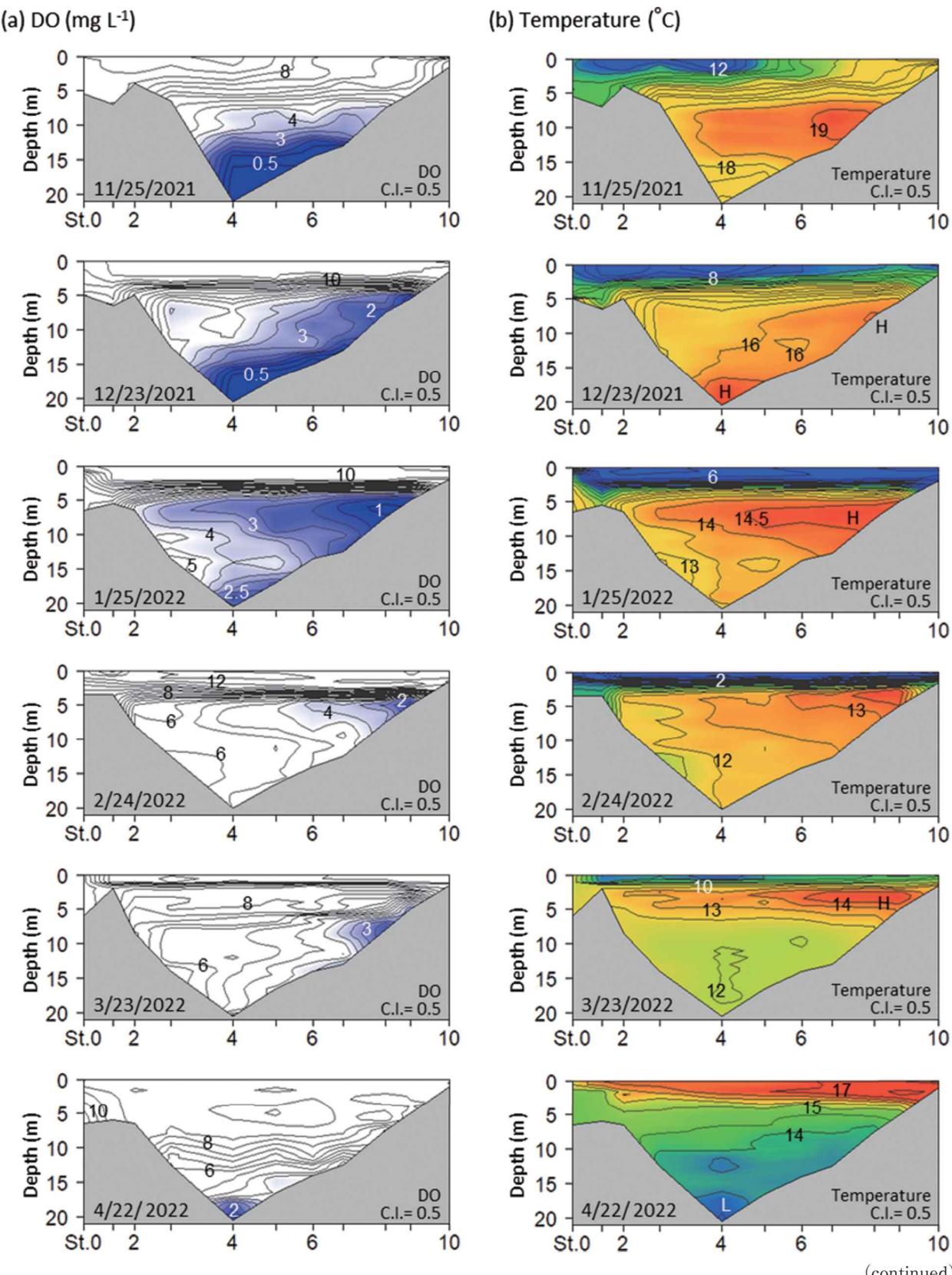


Fig. 4 Monthly longitudinal distributions of (a) DO ( $\text{mg L}^{-1}$ ), (b) Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), (c) Salinity and (d) Sigma-t ( $\text{kg m}^{-3}$ ). C.I. indicates contour interval.

13–14 °C、3月は12–14 °Cであった。

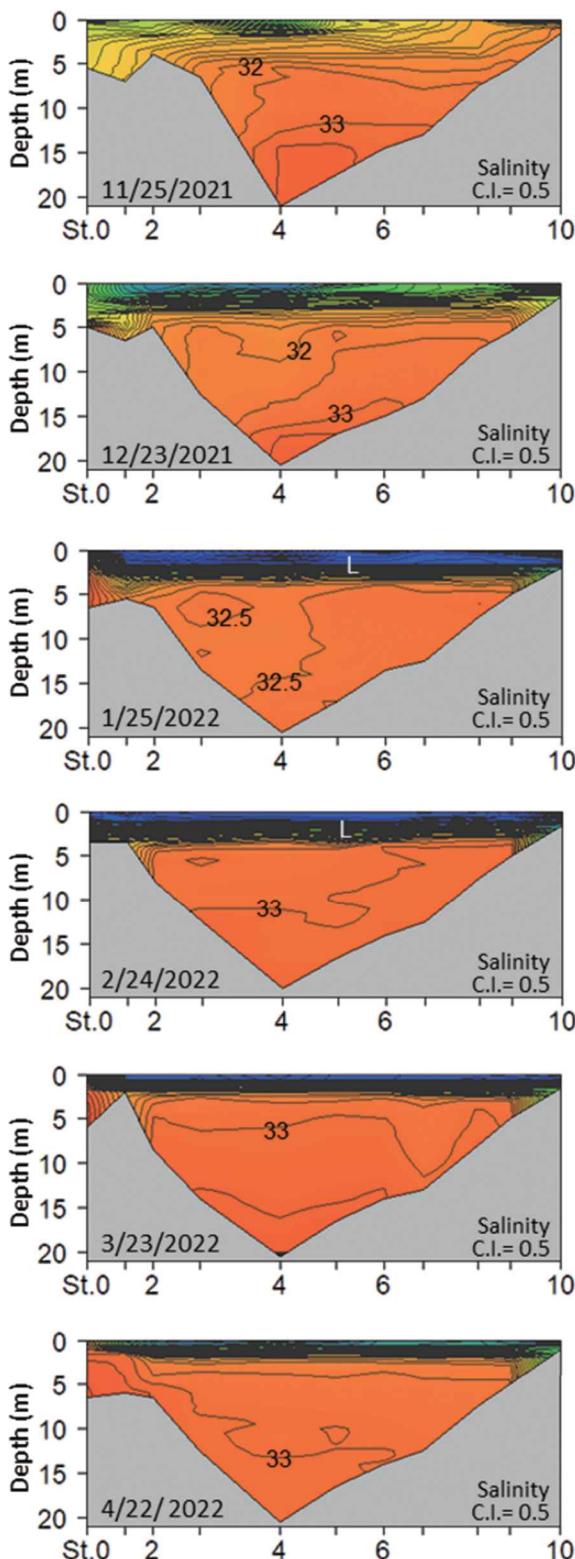
4月には、St. 4の18 m以深では、水温13.5 °C以下の、周囲より低温の水塊がみられた。水深4 m以浅は、水温が15 °C以上と3月の湾内水温よりも高かった。水深1 m以浅は、塩分20以下で、密度15以下の低密度の水塊が

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。

–continued–

(c) Salinity



(d) Sigma-t ( $\text{kg m}^{-3}$ )

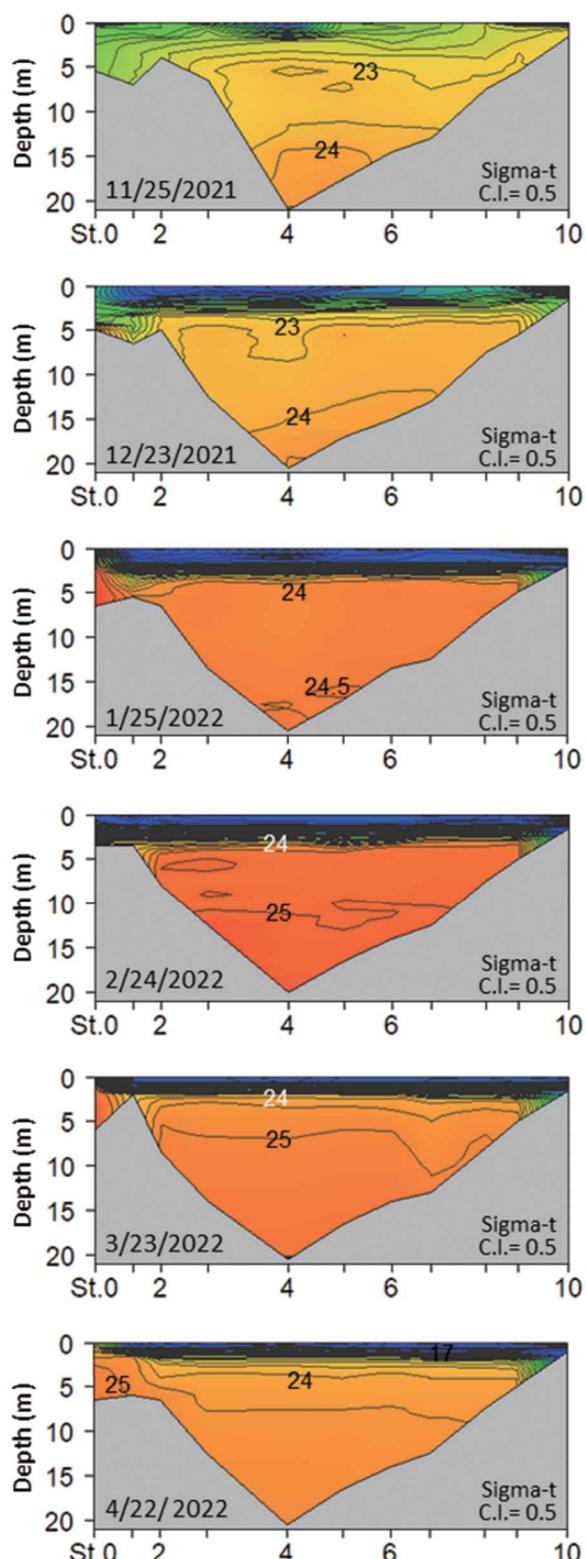


Fig. 4 Monthly longitudinal distributions of (a) DO ( $\text{mg L}^{-1}$ ), (b) Temperature (°C), (c) Salinity and (d) Sigma-t ( $\text{kg m}^{-3}$ ). C.I. indicates contour interval.

### 3.2.2 DO

2021年11月から2022年4月の各月におけるDOの鉛直縦断面の結果をFig. 4aに示した。

11月の湾内には、湾中央部の水深約12m以深に、DOが $3\text{ mg L}^{-1}$ 以下の貧酸素水塊が存在した。一方、10m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13m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5-12m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2m以内にも存在したほか、湾全体の水深4.5-13mの中層に広く分布した。特に、DOが $1\text{ mg L}^{-1}$ 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6m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4.5-5.5mでDOが $1\text{-}3\text{ mg L}^{-1}$ 、3月はSt. 8およびSt. 9の底層付近でDOが $2\text{-}3\text{ mg L}^{-1}$ 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18m以深でみられた。

湾全体の2m以浅は12月から3月にかけて、DOが $10\text{ mg L}^{-1}$ 以上の高DOの水塊に覆われていた。

### 3.3 湾奥底層DOの季節変動(公共用水域水質測定)

京都府公共用水域水質測定の湾奥部定点における、底層DOの、2012から2019年度の月別平均値をFig. 5aに示した。DO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から2019年度の毎月の結果をFig. 5b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DOが極小となっていた。

## 4. 考察

### 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<sup>1)</sup>によれば、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. 6に示した。汽水湖では、外海水が湖内の等密度層に貫入していくことが知られている<sup>9, 10)</sup>。外海水の貫入は、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貫入する外海水の流動、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. 5に示した湾奥底層DOの複数年の結果は、この季節変動を裏付けるも

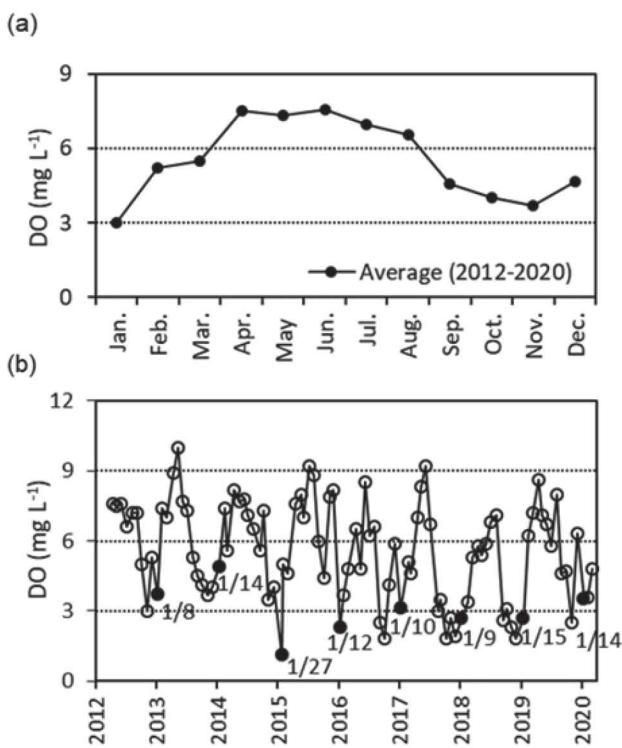


Fig. 5 (a) Monthly average DO ( $\text{mg L}^{-1}$ ) and (b) monthly data of DO ( $\text{mg L}^{-1}$ ) of lower layer at inner part of Kumihama bay (equivalent to St. 9). Solid circles and attached numbers in Fig. 5(b) indicate the data of each January and date of the observation.

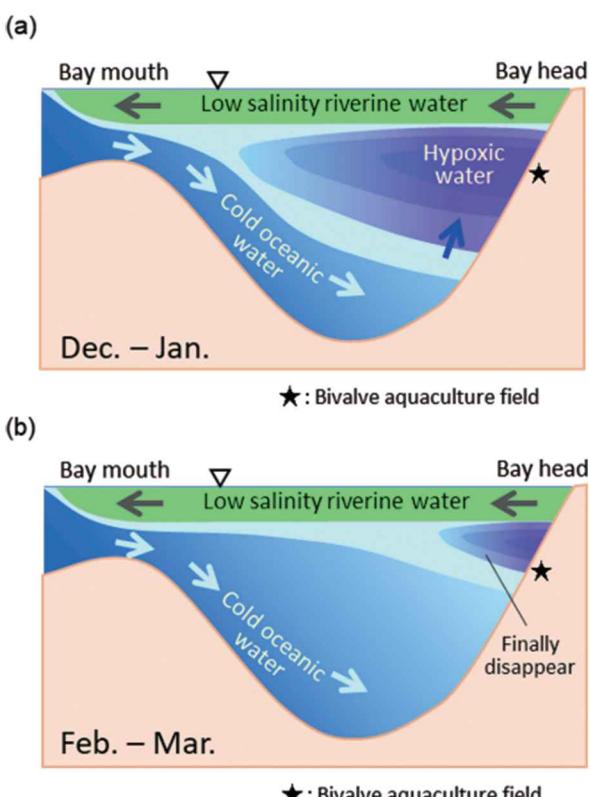


Fig. 6 Schematic view indicating (a) generation of subsurface hypoxic water mass in winter<sup>8)</sup>, and (b) breakdown process of the hypoxic water mass from winter to spring.

のである。St. 4（最深部）底層のDOは、冬季に大きく改善したものの、4月には再び $3\text{ mg L}^{-1}$ 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、入れ替わりでは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<sup>11)</sup>や伊勢湾<sup>12)</sup>などの内湾や、港湾のくぼ地<sup>13)</sup>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。

#### 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<sup>2, 14)</sup>や池田湖<sup>15)</sup>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<sup>16)</sup>。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. 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<sup>17~19)</sup>、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<sup>20)</sup>、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<sup>21)</sup>。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月中旬に年間で最大となる（Fig. 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繁に観測されており（Fig. 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. 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<sup>22)</sup>、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<sup>23)</sup>。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、一時的に積雪となつ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。風の影響を考慮した混合状況を示す指標の一つとして、ウェダバーン数 $W$ が知られており、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<sup>1)</sup>。例えば、宍道湖では、風速が $10\text{ m s}^{-1}$ 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<sup>1)</sup>。ウェダバーン数 $W$ は、主に上下層の密度差、最大風速、湖上風の吹送距離 $L$ 、湖の深さ $\delta$ によって変化する。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は常に $10\text{ kg m}^{-3}$ 以上（最大は3月で $20\text{ kg m}^{-3}$ 以上）であった（Fig. 4d）。吹送距離は、風向によって異なるが、久美浜湾での最大値は北東–南西方向で、約4,000 mである。 $L$ が大きくなると $W$ は小さくなるため、 $L$ を最大値である4,000 m、深さ $\delta$ を湖の最深部の深さ20 mとし、密度差を期間中の最小値である $10\text{ kg m}^{-3}$ として計算すると、 $W = 1$ となる最大風速は約 $45\text{ m s}^{-1}$ となる。実際には、12月から翌3月の密度差は、より大きく、風向によって吹送距離は、より短くなる。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 $9\text{--}22\text{ m s}^{-1}$ であり、風向に関わらず、風によって混合が起きる可能性は極めて低い。

#### 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、DO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月から次第に外海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外海水の流動、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。しかしながら、到達の詳細なタイミングについては未解明であり、今後は気圧や潮汐などを含めて解析し、明らかにしていく必要がある。

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DO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DOにも影響すると考えられる。立川ら<sup>24)</sup>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。久美浜湾に対する淡水流入量の経年変化と底層DOの長期変動の関係解明については今後の課題としたい。

### 謝 辞

毎月の観測実施には村岡克氏にご協力頂き、自動観測データの使用については京都府漁業協同組合の承諾を得た。ここに謝意を表します。本稿改善のための貴重なご意見とご指摘をいただいた3名の査読者に感謝します。

（原稿受付 2023年5月15日）  
（原稿受理 2023年8月2日）

### 参考文献

- 1) 環境省水・大気環境局水環境課, 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> (2022年12月時点).
- 2) 藤原建紀, 2014. 第10章 貧酸素水塊の形成と挙動. 日本海洋学会沿岸海洋研究会編, 詳論 沿岸海洋学. 恒星社厚生閣, 東京, pp. 171-189.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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), I\_499-I\_504.
- 6) 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.
- 7) 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, 兵庫.
- 8) 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.
- 9) 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. 東京電機大学出版局, 東京.
- 10) 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(2), 129-140.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 藤井智康, 藤原建紀, 鞠師弘一, 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), I\_1285-I\_1290.
- 14) 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.
- 15) 宮元誠, 鞠憲弘, 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. 鹿児島県環境保健センター所報 17, 101-104.
- 16) 松田義弘, 1999. 浜名湖水のふしげー内湾の自然と海水の動き-. 静岡新聞社, 静岡.
- 17) 知北和久, 福山龍次, 坂本博明, 中路見平, 1997. 閉鎖性汽水湖における死水の挙動特性: 鋸路市・春採湖での結氷期観測から. 北海道大学地球物理学研究報告 60, 13-28.
- 18) 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.
- 19) 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. 千葉大学教育学部研究紀要 59, 319-332.
- 20) 鈴木秀夫, 1962. 日本の気候区分. 地理学評論 35(5), 205-211.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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.

### [論 文 要 旨]

汽水湖である久美浜湾では、冬季に貧酸素水塊が二枚貝養殖に被害を及ぼすが、その消長の詳細は未解明である。これを明らかにするため、水温、塩分、溶存酸素濃度の分布の季節変動を調べた。貧酸素水塊の解消過程では、亜熱帯性の湖沼や閉鎖性内湾でみられるような冬季の鉛直混合はみられず、12月から3月にかけて、湾口部からの外海水の進入および河川水の運行 (entrainment) によって貧酸素水塊が徐々に縮小した。久美浜湾のような本州中部日本海側に位置し、流入河川の流域の標高が高くなき汽水湖では、冬季に降水量が多く、降雨や数日で融ける降雪がただちに淡水として海域に流入するため、上層に強い密度成層が形成され、鉛直混合が阻害されていた。その結果、夏季に底層で発生した貧酸素水塊は、冬季まで残存し、湾口から流入した外海水によって持ち上げられ、中層貧酸素水塊となり、養殖漁場へと到達することが明らかになった。

**キーワード:** 汽水湖；貧酸素；通年成層；二枚貝養殖；久美浜湾