

久美浜湾における冬季の貧酸素化

船越裕紀, 久田哲二, 藤原建紀

Winter hypoxia: a hydrographic survey in Kumihama Bay

Yuki Funakoshi, Tetsuji Hisada and Tateki Fujiwara*

Usually, hypoxia of an inner bay occurs in summer and autumn. However, hypoxia of the bivalve aquaculture field in Kumihama Bay occurs in winter. To investigate the cause of this phenomenon, we surveyed vertical distributions of temperature, salinity, and dissolved oxygen (DO) concentrations at various observation stations all over the bay. Our results suggest that oceanic water flowing into the bay through the bay mouth raises a hypoxic water mass from the bottom to the subsurface, and this hypoxic water mass reaches the bivalve aquaculture field.

キーワード: 冬季の貧酸素化, 中層貧酸素水塊, 養殖, 久美浜湾

京丹後市の北西に位置する久美浜湾は、湾口部は幅30 m、深さ5 mほどの水路でのみ日本海とつながっており、極めて閉鎖的な内湾である (Fig. 1)。最深部は湾の北東部に位置し、その深さは約20 mである。久美浜湾には東から佐野谷川、南から川上谷川と久美谷川が流入しており、湾内上層は汽水である。湾内ではマガキ *Magallana gigas* やトリガイ *Fulvia mutica* などの二枚貝養殖が盛んで、マガキの養殖漁場は湾口から湾西部にかけて、佐野谷川の河口付近、湾中央部西岸にあり、このうち湾口付近ではトリガイも養殖されている。

内湾の貧酸素化は、一般に、夏季から秋季に底層で起きる (藤原, 2014)。そのため、養殖は水深10 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。

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. 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. D1からSt. D3は、湾口から南西に延びる枝湾の中にあり、この部分の水深は10 m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 MiniSonde5X 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。

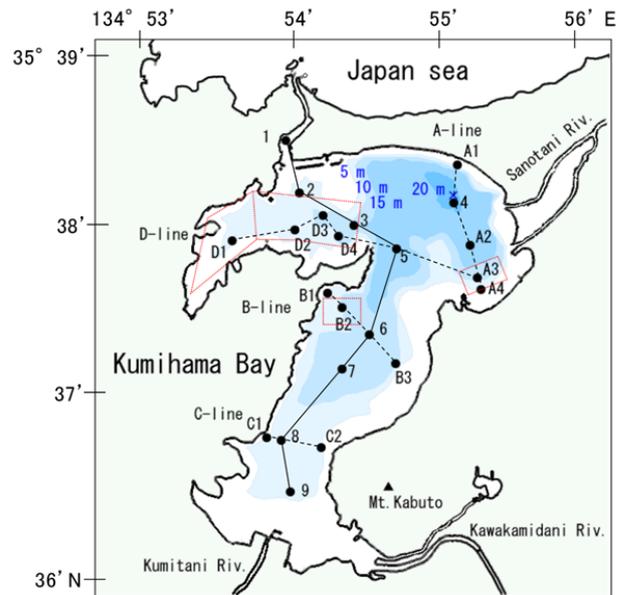


Fig. 1 Map showing study area with observation stations (solid circles). Dashed line show the longitudinal transect. Solid lines show the transects (A-transect: A1-4-A2-A3-A4; B-transect: B1-B2-6-B3; C-transect: C1-8-C2; D-transect: D1-D2-D3-D4-5-A3). Red quadrangles indicate bivalve aquaculture areas.

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、国立環境研究所から借用した多項目水質計 HYDROLAB H20 を用いて実施された。

* 京都大学名誉教授 (Emeritus professor of Kyoto University, Ishiyamadera 3-24-1-405, Otsu City, 520-0861)

結 果

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

鉛直縦断面の結果を Fig. 3 に示した。湾全体は成層しており、水温 5℃未満の低温で塩分 15未満の低塩分の水が水深 2 m 以浅の上層を覆い、上層水の DO は 12～13 mg/L 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℃、DO 6～10 mg/L の海水が広がっていた。一方、St. 5 より湾奥では、水深 6～10 m の中層に水温が 14℃以上と高く、DO が 1～4 mg/L 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 の水深 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。

次に、A～D 線における鉛直横断面の結果をそれぞれ Fig. 4 に示した。A 断面では南側にあたる St. A2 および St. A3 の水深 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 の水深 8 m では DO が 3.4 mg/L と、A 断面で最も低かった。

B 断面でも、水深 6～12 m の中層に、水温 14℃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 mg/L 以下と低かった。特に、St. B2 の水深約 10 m では DO が 2.8 mg/L、St. B3 の水深約 7.5 m では 1.8 mg/L と低かった。水深の浅い C 断面では、B 断面中層 (水深 6～12 m) にみられた高温・低 DO の水塊は、水深 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、DO が 2 mg/L 未満の貧酸素水が覆っていた。

D 断面の St. D1～D4 (枝湾) の水深 6 m 以深の下層の水温は 12℃台であり、St. 1 の水深 3 m 以深および St. 2 の水深 5 m 以深の湾口下層の水温 (Fig. 3) と等しく、DO も 6.5 mg/L 以上と同様であった。一方、St. 5 および St. A3 では、水深 6～10 m の中層に水温 14℃以上で DO 4 mg/L 以下の高温・低 DO 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. 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℃以上の海水が水深 4～10 m の中層に存在し、この高温水の DO は 1 mg/L 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・DO 飽和度の鉛直分布を Fig. 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。水深 2 m 付近までのごく表層は塩分 30 以下の汽水であり、水深 4 m 付近までは低塩分で高温の海水が覆っていた。水深 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。DO 飽和度は、水深 6 m 以浅では 80～100%であったが、水深 6～9 m で急減し、水深 9 m 以深では無酸素 (DO 0 mg/L) であった。

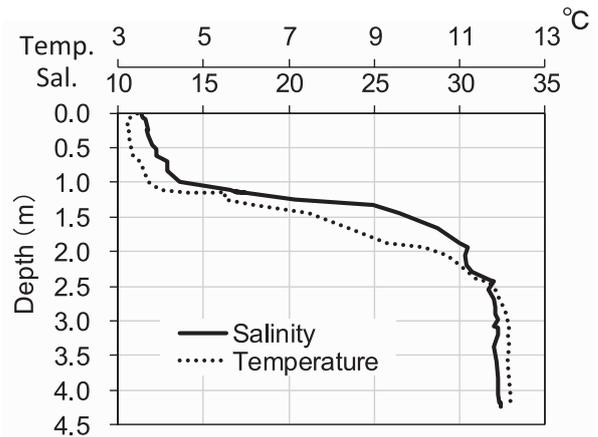


Fig. 2 Vertical profiles of salinity and temperature (°C) measured in the bay mouth channel (St. 1) in 26 January 2017.

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. 7 に模式的に示した。冬季に湾口から流入した湾外水が、久美浜湾の底層付近に流入し、それまで底層にあった貧酸素水塊 (DO 2 mg/L 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、水深 10 m 以浅で行われている二枚貝養殖水深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、DO の分布 (Fig. 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 DO 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. 5) は 2017 年 1 月の結果と同様、あるいは、湾外水の底層流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. 7 は縦断面を模式化しているが、横断面でも、水深 8 m 付近 (St. A3, B2, B3 など) が低酸素化 (DO 2～4 mg/L) 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/m³ 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、湾内水は上層から流出し、湾外水は下層を通過して流入していると考えられる。湾内に流入した湾外水は、湾内の等密度層に密度流として貫入することとなる (有田ら, 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、湾外水の貫入深度の下限は 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

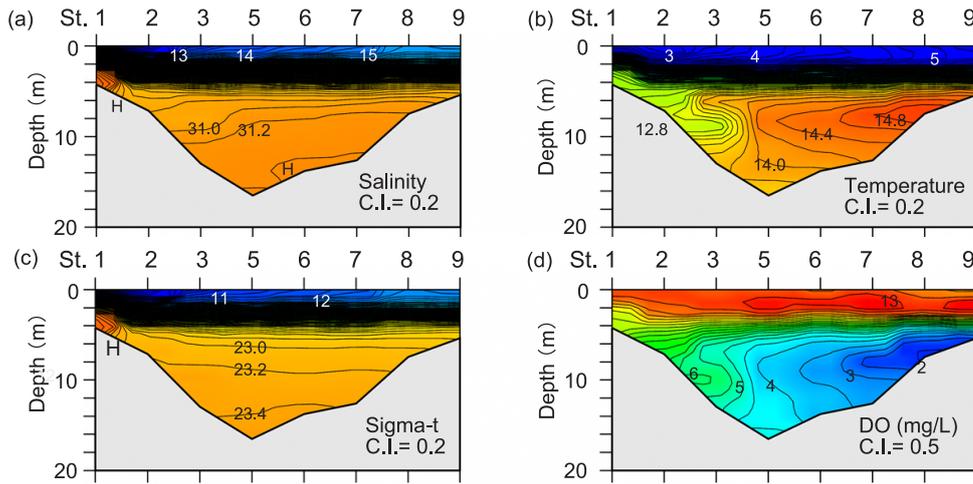


Fig. 3 Longitudinal distributions of (a) salinity, (b) temperature(°C), (c) sigma-t (kg/m³) and (d) DO (mg/L) measured in 26 January 2017. C.I. indicates contour interval.

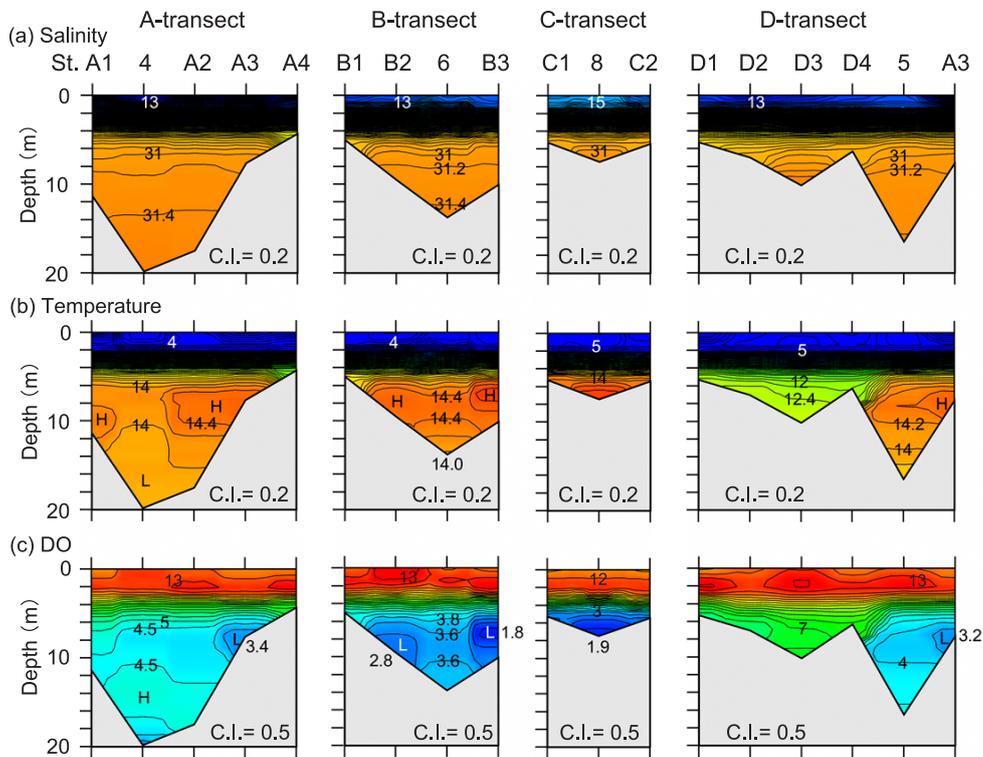


Fig. 4 Longitudinal distributions of (a) salinity, (b) temperature (°C), and (c) DO (mg/L) along A-, B-, C-, and D-transects on 26 January 2017. C.I. indicates contour interval.

において、湾外水は水深約 10 m 以深には貫入せず、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貫入することはないため、中層の貧酸素化は起こらない。

本研究では、冬季に貧酸素水塊が二枚貝の養殖水深まで上昇することを示した。しかし、上昇のタイミングや期間についてはさらなる検証が必要である。現在、久美浜湾では、トリガイの養殖筏に自動観測

装置を設置して 1 時間に 1 回、水温、塩分、DO の鉛直観測を行っており、データをリアルタイムで確認することができる。今後、このデータ等を用いて貧酸素水塊の変動特性を解明し、養殖水深への襲来を予測する技術の開発が可能であろう。

謝 辞

湊漁業株式会社の担当者の方には、地形を考慮したアドバイスや適切な船の運航等、調査にご協力を

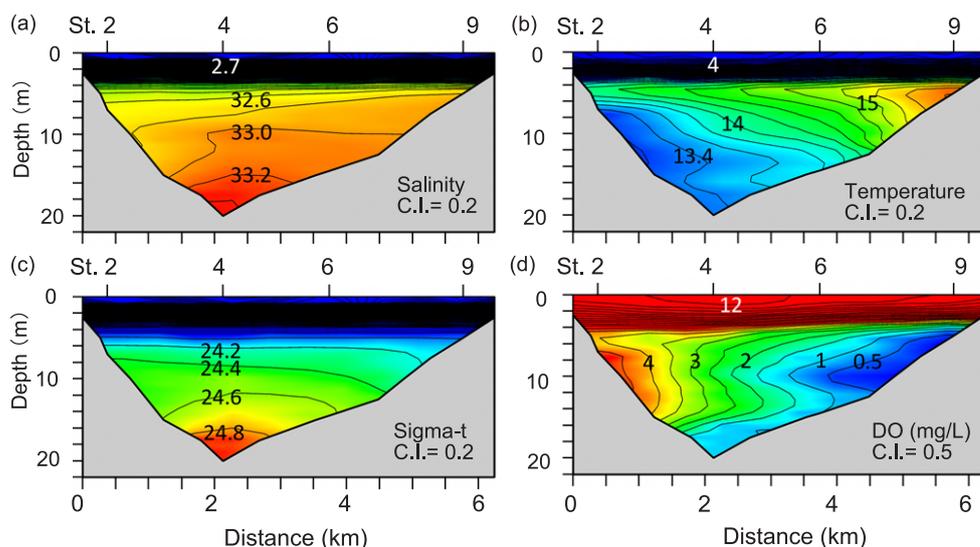


Fig. 5 Longitudinal distributions of (a) salinity, (b) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (c) sigma-t (kg/m^3), and (d) DO (mg/L) measured on 7 February 2012. C.I. indicates contour interval.

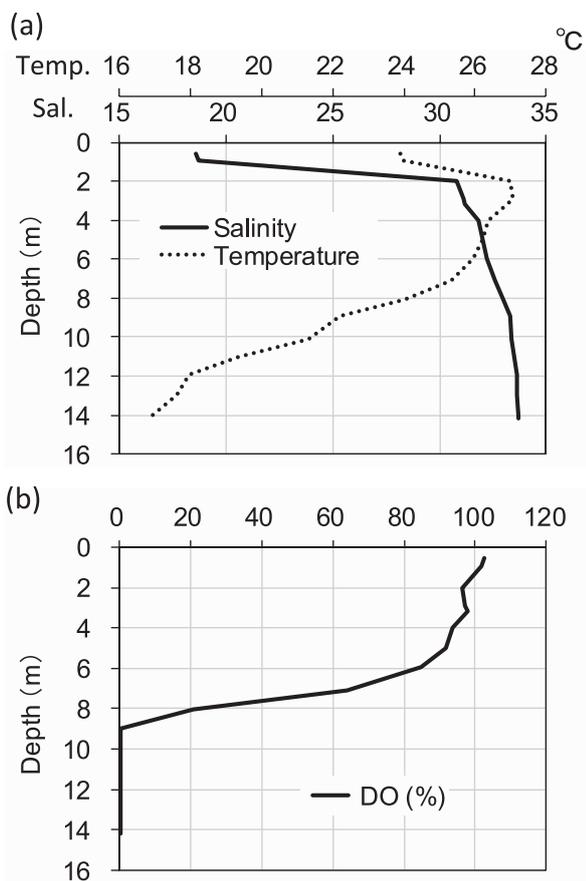


Fig. 6 Vertical profiles of (a) salinity and temperature ($^{\circ}\text{C}$), and (b) DO-saturation (%) measured at St. 4 on 2 August 2011.

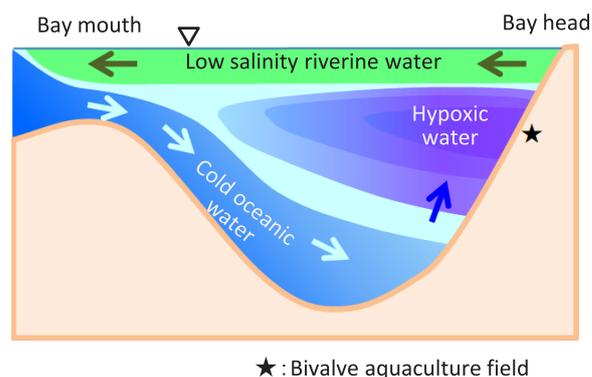


Fig. 7 Schematic diagram showing the generation of a subsurface hypoxic water mass in winter.

頂きました。厚くお礼申し上げます。久美浜湾における冬季・夏季の縦断調査データをご提供いただいた京都府保健環境研究所の蒲 敏幸水質課長（調査時）に感謝いたします。

文 献

- 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」, 404. 東京電機大学出版局, 東京.
- 藤原建紀. 2014. 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.
- 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.