

長期間の連続観測データからみた中海の下層における 溶存酸素濃度の変動特性

金 相曄¹・濱田孝治²・南 憲吏¹・清家 泰¹

Understanding dissolved oxygen variation in Lake Nakaumi using long-term observational data

Sangyeob Kim¹, Takaharu Hamada², Kenji Minami¹ and Yasushi Seike¹

Abstract: In Lake Nakaumi, a semi-closed brackish lake, hypoxic water masses have occurred frequently. In order to understand variation in dissolved-oxygen concentration (DO) in Nakaumi, an analysis of 24 years (1993–2017) of water quality data was performed. As a result, the fluctuation of DO in the hypolimnion of Nakaumi could be divided into three patterns: (1) Months in which the stratification index had the greatest impact (October to January), (2) The effect of the sea water on the hypolimnion (February and March), and (3) Months in which the hypolimnion temperature has the greatest contribution to changes in the lake's DO (April to October). For example, it can be shown that hypoxia in the hypolimnion from June to September was due to bacterial oxygen consumption during warm water temperature conditions, rather than due to the intensity of stratification itself.

Key words: dissolved oxygen, stratification index, Lake Nakaumi

はじめに

島根県と鳥取県の県境に位置する中海と宍道湖は、2005年にラムサール条約に登録され、生物多様性など、豊かな自然環境が注目されている。中海は、日本海から境水道を通じて流入する高塩分の海水と、斐伊川から宍道湖を通じて流入する淡水が混合する閉鎖性の強い水域であり（国土交通省・湖沼技術研

究会, 2007）、密度成層の形成による下層の貧酸素化が顕著である。その貧酸素化によって酸欠となり、ハゼ類などの魚類が沿岸部でへい死するなど（島根県水産技術センター, 2008）、中海の生物に大きな被害が発生している（石飛ほか, 2000）。一方、中海の上流にある宍道湖でも夏季に貧酸素水塊がしばしば確認されている。その原因としては、中海からの海水の貫入に伴う塩淡水成層（福岡ほか, 2005; 藤井ほか, 2006）や夏季の水温上昇に伴う酸素消費の増大の影響などが

¹ 島根大学エスチュアリー研究センター・Estuary Research Center, Shimane University, 1060 Nishikawatsucho, Matsue 690-8504, Japan.

² 全国水産技術協会・Japan Fisheries Science and Technology Association, Sankaidou Bld., 1-9-13 Akasaka, Minato-Ku, Tokyo, 107-0052, Japan.

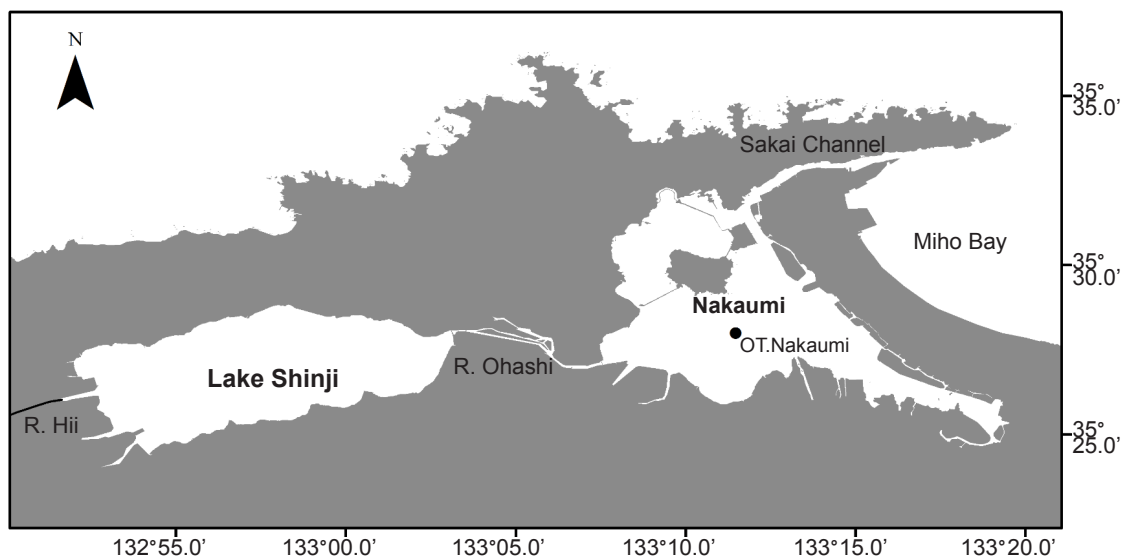


図1 中海における自動水質測定装置の位置。

Fig. 1 Location of the automated water quality measurement tower in Lake Nakaumi.

指摘されている。特に、宍道湖で発生する貧酸素水塊の体積は、湖容積に対して数%と少ない体積であるものの、風による吹送流の影響で貧酸素水塊が浅場に移動して発生する「青潮」が大きな問題になっている(増木ほか, 2013)。このように、貧酸素水塊は、魚介類の分布域の変化を引き起こすほか、場合によってはそれが引き金となって魚介類の大量へい死に繋がるといわれている(丸茂・横田, 2012)。また、中海水が希釈なく宍道湖へ流れ込むとともに、中海の貧酸素水塊が宍道湖の底層へ貫入することが指摘されている(Ishitobi et al., 1989; 福岡ほか, 2005)。そのため、中海における貧酸素水塊の発生機構の究明は、宍道湖から大橋川や中海までのエスチュアリーにおける自然環境を適切に管理するためにも必要な課題の一つといえる。本研究では、中海湖心において長期間に計測されている水質データを用いて、中海の下層における溶存酸素濃度の変動特性を明らかにするとともに、その変動に対する環境要因の寄与を明らかにした。

方法

1. 水質データ

図1に示す国土交通省(OT.Nakaumi)が運用している観測タワー(北緯:35度27分59秒, 東経:133度11分29秒, 湖底の水深約 T.P.-6.5m)から水質データ(多項目水質自動観測装置 KW-2・株式会社鶴見精機)を提供いただいた(野中ほか, 2003)。期

間は1993年4月から2017年3月までの24年間であり、項目は表層(T.P.-0.5m)、上層(T.P.-1.0m)、中層(T.P.-3.5m)、下層(T.P.-5.5m)、底層(T.P.-6.0m)の5層における水温、塩分、溶存酸素濃度(以下DO)の毎時データを用いている。

2. 密度成層度(Stratification Index)の算出

DO変動に対する要因の中で、密度差の影響を検討するため、鉛直の密度成層度を算出する(Simpson et al., 1990)。

$$SI = -\frac{1}{H} \int_{-H}^0 (\rho - \bar{\rho}) g \cdot z \cdot dz.$$

ここで、 H は水深、 ρ は密度、 $\bar{\rho}$ は密度の鉛直平均値、 g は重力加速度、 z は水表面から鉛直上向きに取った座標である。海水の密度(ρ)は、水温、塩分、圧力(浅海は水深が比較的浅いため一定値)に基づいて算出した(UNESCO, 1981)。また、成層状態では非成層状態よりもSIの値が高いことを意味する。

結果と考察

1. 下層の溶存酸素濃度と密度成層度の変動特性

図2は、1993年4月から2017年3月までの24年間の国交省の中海湖心観測タワーの下層における溶存酸素濃度(以降DOと略記)と中海の密度成層度

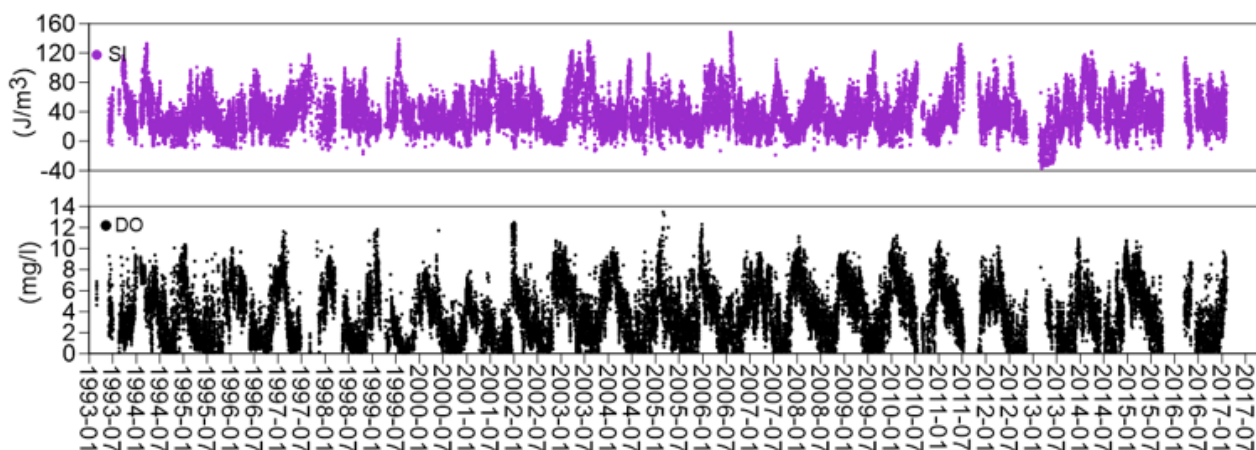


図2 1993年から2017年までの中海湖心における密度成層度(SI, Simpson et al. 1990 参照)と下層の溶存酸素濃度(DO)の変化。

Fig. 2 Variation in Stratification Index (SI) and Dissolved Oxygen (DO) in the hypolimnion of Lake Nakaumi from 1993 to 2017. For the calculation of SI, see Simpson et al. (1990).

(以降 SI と略記) の時系列変動を示す。DO は、約 0.1 ~ 13 mg/l の範囲で変動しており、春季から夏季にかけて徐々に減少し、秋季から冬季に回復する傾向が見られた。特に、DO が 2 mg/l 以下の貧酸素水塊 (Diaz et al., 2008) が発生したのは、欠損値を除いた総データ数 (174,815 時間) のうち約 50,440 時間 (24 年間で約 29%) であることから、中海は貧酸素化した水域であると判断された。一方、中海の SI は、24 年平均で約 38 J/m³ で、夏季に密度成層が強化される傾向があり (6 ~ 8 月の平均が約 47 J/m³)、冬季も密度成層が形成される特徴があった (12 ~ 2 月の平均が約 31 J/m³)。また、松江気象台における夏季 (6 ~ 8 月) の降水量が 400mm 以下で少なかった年度 (1994, 2000, 2002, 2008, 2015, 2016) の SI の平均は約 34 J/m³ であり、そうではない年度の SI (約 52 J/m³) より低いことが分かった。DO と SI の関係を明らかにするため回帰分析を行ったが、有意な相関は得られなかった (p=0.00)。特に、夏季に降水量が少なく SI が低かった年度における下層の DO 平均が約 2.9 mg/l で、そうではない年度の DO は約 3.1 mg/l であり、ほとんど差がなかった。したがって、中海の下層における DO 変動特性を明らかにするためには、環境因子の月ごとの変動特性を明らかにするとともに、DO の変動に対する SI・塩分・水温・気象状況などのそれぞれの影響を検討する必要がある。

2. 中海における環境因子の月ごとの変動特性

中海における環境因子の変動特性を確認するため、

1993 年 4 月から 2017 年 3 月の 24 年間の中海湖心における水質 (DO, SI, 水温, 塩分など) データから月ごとの平均値を算出し、経月変化に着目した考察を行った。

図 3 は、下層の DO の月平均を示す。図 2 でも明らかになったように、1 月から 9 月まで徐々に DO が減少し、その後 10 月から回復する傾向が見られる。特に 7 月 ~ 9 月は、DO の月平均が 2mg/l 以下であることから、夏季の中海下層は貧酸素化しているのが月平均でも明らかになった。一方、DO の月平均は、10 月から 12 月に大きく増加し、2 月から 3 月に大きく減少する傾向が見られた。

図 4 は、上層と下層の水温差を示す。4 月 ~ 8 月は、上層の水温が下層より高く (水温成層)、9 月は、上層と下層の水温差がほとんどなかった。一方、10 月 ~ 12 月および 1 月 ~ 3 月は、下層の水温が上層より高かった (逆転水温成層)。このような 10 月 ~ 3 月における逆転水温成層は、淡水湖では考えられない現象であり、中海のように強固な塩分躍層を有する汽水湖の特性と考えられる。

図 5 は、下層の水温の月平均を示す。2 月から 8 月まで下層の水温が増加、9 月から 1 月には減少する傾向が見られた。特に、8 月および 9 月の下層の水温は、25°C 以上であった。

図 6 は、下層の塩分の月平均を示す。中海の下層の塩分は、12 月から 5 月まで増加し、9 月まで減少した後、11 月までは若干増加する傾向が見られた。

図 7 は、密度成層度 (SI) の月平均を示す。中海では、

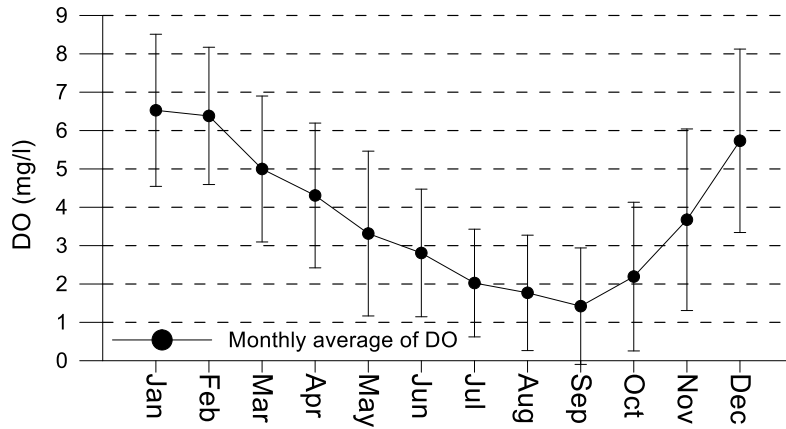


図3 中海湖心の下層における DO の月ごと平均値 (縦棒は ± 1 標準偏差).
 Fig. 3 Monthly average DO values, Lake Nakaumi hypolimnion. Vertical bars are \pm one standard deviation.

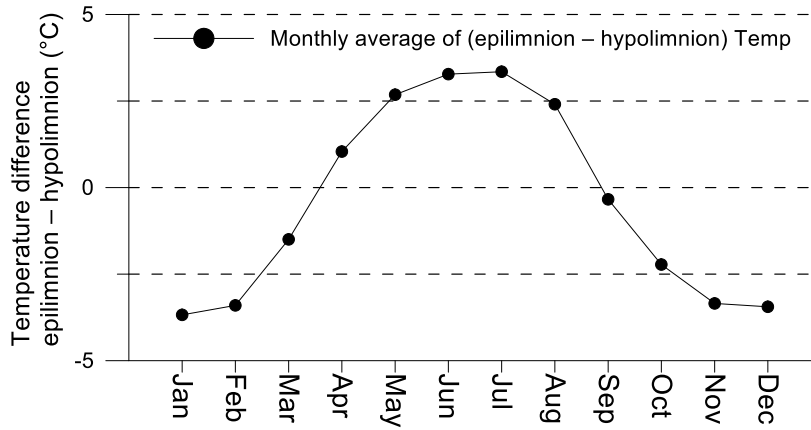


図4 中海湖心における水温差 (表層と下層) の月ごと平均値.
 Fig. 4 The epilimnion / hypolimnion temperature difference in Lake Nakaumi, monthly averages.

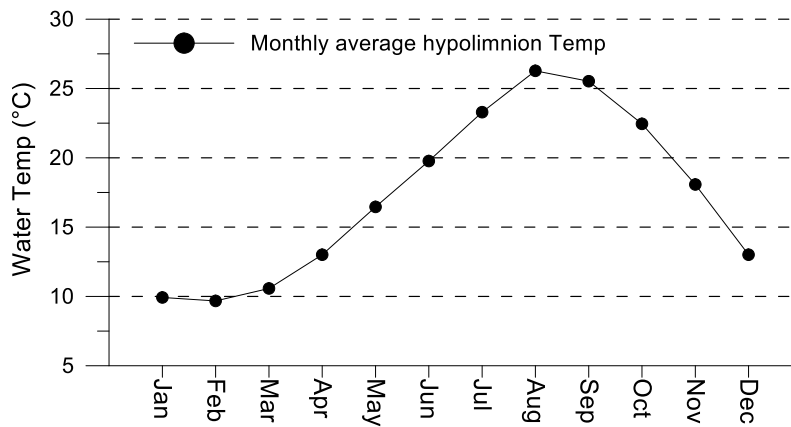


図5 中海湖心の下層における水温の月ごと平均値.
 Fig. 5 Monthly average hypolimnion temperature in Lake Nakaumi.

長期間の連続観測データからみた中海の下層における溶存酸素濃度の変動特性

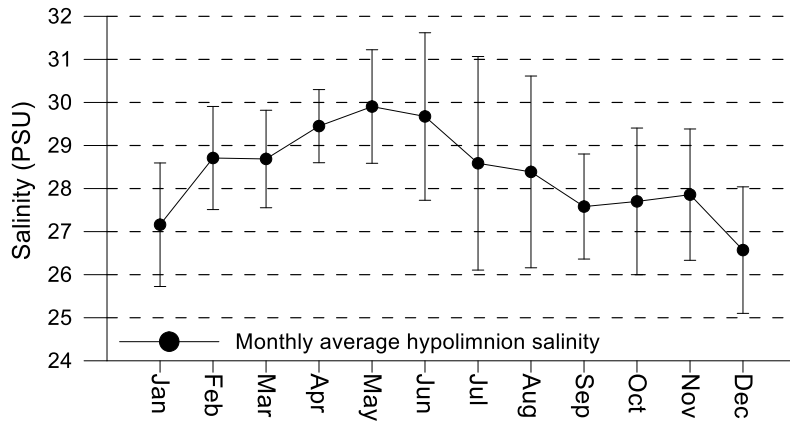


図6 中海湖心の下層における塩分の月ごと平均値。縦棒は±1標準偏差を示す。
Fig. 6 Monthly average hypolimnion salinity in Lake Nakaumi. Vertical bars are ± one standard deviation.

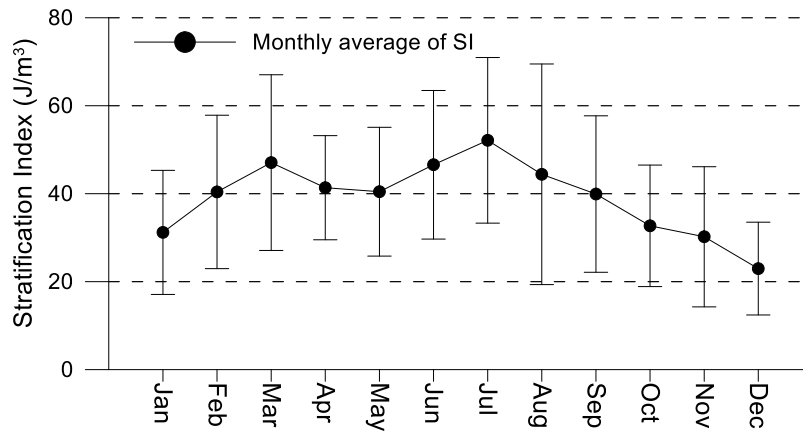


図7 中海湖心におけるSIの月ごと平均値（縦棒は±1標準偏差）。
Fig. 7 Monthly average hypolimnion salinity in Lake Nakaumi. Vertical bars are ± one standard deviation.

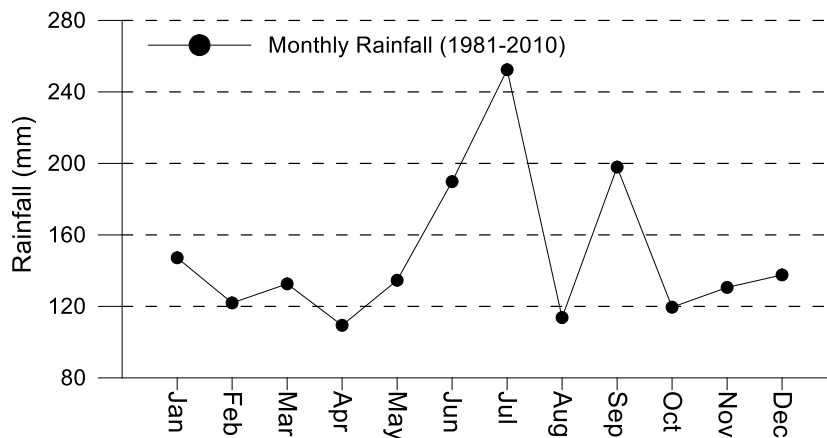


図8 1981年から2010年までの島根県における降雨量の月ごと平均値。
Fig. 8 Monthly average rainfall in Matsue, Shimane prefecture, 1981–2010.

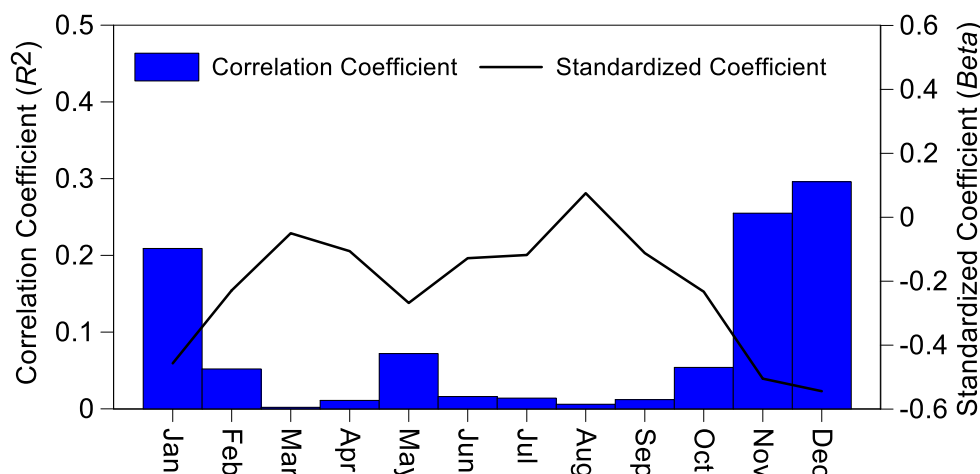


図9 各月の下層におけるDOとSIの回帰分析結果。

Fig. 9 Regression analysis result comparing SI and hypolimnion DO for each month.

3月と7月に2つのSIのピークがあった。特に、SIが12月から3月まで増加し(1回ピーク)、その後5月まで減少、再び7月まで増加し(2回ピーク)、その後12月まで減少する傾向が確認された。

図8は、気象庁の松江気象台における降雨量の30年間(1981-2010)の月平均を示す(気象庁データベース)。地中海の周辺の降雨量は、6月と7月と9月に急増する傾向があり、4月と8月は降雨量の月平均が120mm以下で少なかった。また、冬季(12月~1月)に雨量がやや多くなる傾向も見られた。このように、地中海のDOの変動とそれに影響を及ぼす環境因子の間では、月ごとに様々な相関関係を示していたため、月ごとの考察が有効であると判断される。

3. 地中海における月ごとのDO変動要因

上述した図3~図8に基づき、以下の月の区分で下層におけるDOの変動要因が分けられる。

10月~1月は、SIの低下(図7)によって鉛直混合の抑制弱化和下層の水温の減少(図5)によるバクテリアの酸素消費の減少(清家, 2001)などの影響でDOが回復(図3)する。一方、10月~11月は、少ない降雨量(図8)に伴ってSIが低下しているのに対して12月~1月は、降雨量が多少あるものの、SIは低くなっている。これは、降雪で山地に雪が積もり、中海への流入までは至っていないためと推測される。また、図9は、SIと下層のDOの月ごとの回帰分析を行った結果である。上述したように、全期間に対するSIとDOの相関は得られていないものの、各月におけるSIとDOの相関をみると、高い相関を示す月がある。特に、

SIとDOの決定係数(R²)が10月から多少増加し、11月~1月には、SIとDOの決定係数(R²)が0.209~0.296程度の負の相関(-0.46~-0.54, Beta)がみられる。したがって、10月~1月の中海下層におけるDOの増加は、密度成層の弱化に起因して鉛直混合が増え、上層からの酸素供給が増えたためと判断される。

2月~3月は、1月よりSIが増加し(図7)、DOは低下する。しかし、図9に示すように2~3月のSIとDOはほとんど相関がない。これは、2月~3月に高塩分の海水の流入によってSIが増加したが、その海水のDOが元々低かったため、密度成層の形成によるDO低下よりは、海水の流入に伴う影響が大きく寄与していたためと推測される。また、その海水の流入は、雪解け水の中海への流入によるエスチュアリー循環の発生など様々な物理現象により生じたと推測される。しかし、2月~3月における中海湖心への海水の流入機構やその時の海水の水質など、本研究で用いたデータのみでは究明が難しい点が多い。今後、更なる現地調査や数値モデルによる解析などより詳細な検討が必要である。

4月~5月は、降雨量は少なく(図8)SIが減少するものの(図7)DOも減少する(図3)。これは、SIの減少による鉛直混合の増加に伴う下層への酸素供給より、水温上昇に伴うバクテリアの酸素消費増加の影響が大きいためと推測される。

6月~7月は、梅雨の降雨量(図8)によるSIの増加(図7)に加え、下層の高い水温(図5)によるバクテリアの酸素消費増加によってDOが急減したと判断される。しかし、図9に示すように、SIとDOの相

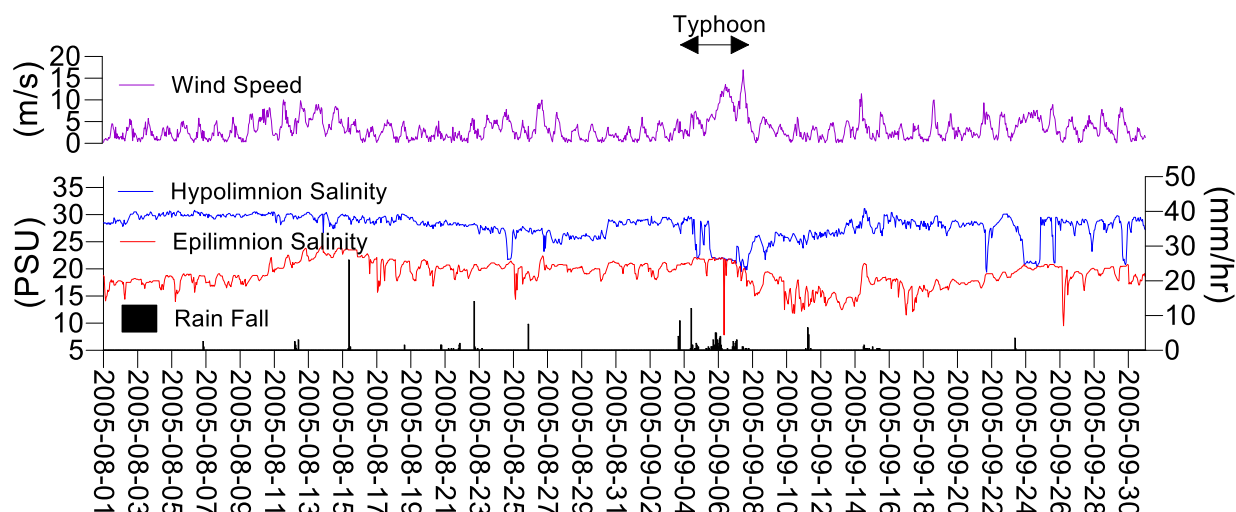


図 10 2005 年の台風接近時の中海湖心における塩分と松江気象台における降雨量と風速の時系列比較。

Fig. 10 Time series data of salinity in stratified Lake Nakaumi during a typhoon in 2005. Rainfall and wind speed data from the Matsue weather station.

関が低いことから、この時期の下層の DO の変動は、SI の強度そのものの影響よりは、密度成層の形成に加えて下層の高い水温 (図 5) によるバクテリアの酸素消費の増加が大きく寄与していると判断される。一方、8 月は降雨量が少ないものの、6～7 月の降雨量の影響で SI がまだ高く、かつ好天気の日射量による高い水温の影響で 6 月～7 月と同様に DO が減少すると判断される。

9 月は、降雨量が多いものの SI が減少している。一方、下層の塩分も減少している。その原因の一つとして台風の影響が考えられる。気象庁のデータによると 1981 年～2010 年の 30 年間に台風の接近件数は、年平均で 11.4 個であり、月別接近件数は、8 月 (3.4 個)、9 月 (2.9 個)、7 月 (2.1 個) である。特に、中海の位置する中国地方も、9 月 (0.9 個)、8 月 (0.8 個)、7 月 (0.5 個) であり、9 月が最も接近件数の多いことが分かる。図 10 は、2005 年 8 月～9 月の中海湖心における上層と下層の塩分と松江気象台における時間雨量および風速を示す。2005 年 9 月 4 日～7 日まで非常に強い台風 (T0514NABI) の影響で大雨と強風に伴う鉛直混合が発生した。特に、9 月 6 日は平均風速約 10.6m/s の強い風による鉛直混合で、下層の塩分が上層の 20PSU 以下まで減少した。その後、下層の塩分が徐々に上昇し、数日後にやっと上層との塩分の差が大きくなる塩淡成層が形成したのが分かる。これまで強風時の中海の上下混合に関しては、Godo et al. (2001) の研究事例がある。彼らは、1996 年 10 月に起こった強風に

伴う下層水の塩分低下に対し詳細な解析を行い、その塩分低下が 2 層流による塩分躍層の傾斜に起因し主として塩分躍層下の塩分低下に寄与したことを報告している。本事例では、上述した通り、ほぼ全層にわたり鉛直混合が生じたものと推察される。したがって、9 月に降雨量が多くても SI が減少するのは、台風の近接に伴う鉛直混合によって下層の塩分が低くなるのが一つの原因であると判断される。一方、下層の水温がまだ高いため、6～8 月と同様にバクテリアによる酸素消費が大きく、下層の DO の減少に寄与していると判断される。

以上のことから、中海の下層における DO の変動は、次の 3 つに大きく分けることができる。① SI の寄与が大きい月 (10 月～1 月)、② 海水の影響が大きい月 (2 月～3 月) ③ 下層の水温の寄与が大きい月 (4 月～10 月) である。特に、10 月は、①と③の影響を両方受けている月である。

まとめ

本研究では、中海の下層における溶存酸素濃度 (DO) の変動特性を明らかにするため、1993 年 4 月～2017 年 3 月までの 24 年間の長期間水質観測データを用いて解析を行った。その結果、中海は常態的に密度成層化し、下層が貧酸素化し易い水域であることが確認された。しかし、密度成層度 (SI) と DO は年間を通しては有意な相関が得られなかったため、月

ごとの解析を行った。その結果、中海の下層における DO の変動は、密度成層、海水の流入、下層の水温などの環境因子から影響を受けており、それぞれの環境因子の寄与度は月ごとに異なっていることが明らかになった。特に、夏季の貧酸素化に対して、6月～7月は梅雨の影響で降雨量が多く、密度成層が強化するものの、SI の強度そのものの影響よりは、下層の高い水温によるバクテリアの酸素消費速度の増加が大きな要因であることが示唆された。一方、9月は、SI の月平均が減少するものの、DO が減少する。この9月における SI の減少は、台風などによる数日間のイベントの影響に起因することが一つの原因であると判断された。このように、中海の下層に発生する貧酸素水塊の診断を行うためには、月ごとの考察が重要であることが明らかとなった。しかし、点のデータを用いて解析を行った本研究では、3次元的な流れ場を考察するにあたって難点が多かった。今後、本研究で不明だった海水の流入の挙動などを明らかにするため、現地調査や数値モデルを用いた考察を行う予定である。

謝 辞

中海湖心における水質データは、国土交通省中国地方整備局出雲河川事務局から提供して頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

引用文献

- Diaz, R.J. and Rosenberg, R. (2008) Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science*, 321: 926–929.
- 藤井智康・森脇晋平・奥田節夫 (2006) 大橋川を遡上する貧酸素水塊の実状と宍道湖に及ぼす影響. *Laguna (汽水域研究)*, 13: 1–7.
- 福岡捷二・山本絢子・岡村誠司・溝山勇 (2005) 宍道湖に流出入する塩分フラックスと湖内塩分濃度の変化. *水工論文集*, 49: 1249–1254.
- Godo, T., Kato, K., Kamiya, H. and Ishitobi, Y., (2001) Observation of wind-induced two-layer dynamics in Lake Nakaumi, a coastal lagoon in Japan. *Limnology*, 2: 137–143.
- Ishitobi, Y., Kamiya, H., Hayashi, K. and Gomyoda, M. (1989) The Tidal Exchange in Lake Shinji under Low Discharge Conditions. *Japanese Journal of Limnology*, 50 : 105–113.
- 石飛裕・平塚純一・桑原弘道・山室真澄 (2000) 中海・

- 宍道湖における魚類および甲殻類相の変動. *陸水学雑誌*, 61: 129–146.
- 気象庁データベース: <https://www.jma.go.jp>
- 増木新吾・戸島邦哲・別所大・和田洋一・管原庄吾 (2013) 宍道湖西岸十四間川における青潮発生時の水質変化. *水環境学会誌*, 36: 143–148.
- 国土交通省・湖沼技術研究会(2007) 湖沼における水理・水質管理の技術. 湖沼技術資料集.
- 丸茂恵右・横田瑞郎 (2012) 貧酸素水塊の形成および貧酸素の生物影響に関する文献調査. *海生研研報*, 15: 1–21.
- 野中崇志・松永恒雄・梅干野晁・中山大介・瀬戸浩二 (2003) 宍道湖・中海における国土交通省自動観測水質データの検証. *Laguna (汽水域研究)*, 10: 101–107.
- 島根県水産技術センター (2008) とびつくす, 45: 1–4.
- Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J. and Allen, G. (1990) Tidal Straining, Density Currents, and Stirring in the Control of Estuarine Stratification. *Estuaries* 13: 125–132.
- 清家 泰 (2001) 汽水域の水質特性. 高安克己編「汽水域の科学—中海・宍道湖を例として」, pp. 19–37, たたら書房, 米子.
- UNESCO (1981) The Practical Salinity Scale 1978 and the International Equation of State of Seawater 1980. In: Tenth Report of the Joint Panel on Oceanographic Table and Standards, UNESCO Technical Papers in Marine Science 36, pp. 13–21, Sydney, B.C., Canada 1980.