

短 報

長期間の連続観測データからみた
宍道湖の水質の変化特性金 相曄¹・瀬戸浩二¹・南 憲吏¹・林 昌平^{1,2}・清家 泰¹Understanding water quality variation in Lake Shinji
using long-term observational dataSangyeob Kim¹, Koji Seto¹, Kenji Minami¹,
Shohei Hayashi^{1,2} and Yasushi Seike¹

Abstract: In the center of brackish Lake Shinji hypoxic water masses have occurred frequently in the bottom layer. These hypoxic water masses cause environmental problems such as the blue tide (cyanobacteria). In this study, we performed statistical analysis using long-term water quality data collected in the center of Lake Shinji from 1993 to 2018. It is known that dissolved oxygen in the bottom layer is affected by the water temperature and salinity of the bottom layer. Furthermore, based on a random forest model constructed for fluctuation in water temperature and salinity of the bottom layer, it was confirmed that the temperature of the bottom layer is mainly tied to local air temperature. In addition, the salinity of the bottom layer is strongly affected by the inflow rate of the Hii River in the interval from 7 days to 4 days prior to bottom water measurement.

Key words: Lake Shinji, Water quality, Machine Learning, Random forest

はじめに

島根県の東北部に位置する宍道湖は(図1), 東西約17 km, 南北約6 km, 周囲長47 kmの日本国内で7番目の面積(約79.24 km²)をもつ大きな汽水湖で

ある(国土交通省・国土地理院, 2021)。宍道湖の平均水深は約4.5 mであり, 湖底はほぼ水平である。底質は, 湖岸部の100 ~ 200 mが砂や砂質泥, 他は大部分が泥である(環境省・湖沼技術研究会, 2008)。宍道湖へ流入する河川は, 1級河川の斐伊川をはじめ,

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

² 島根大学生物資源科学部・Faculty of Life and Environmental Science Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane, 690-8504, Japan.

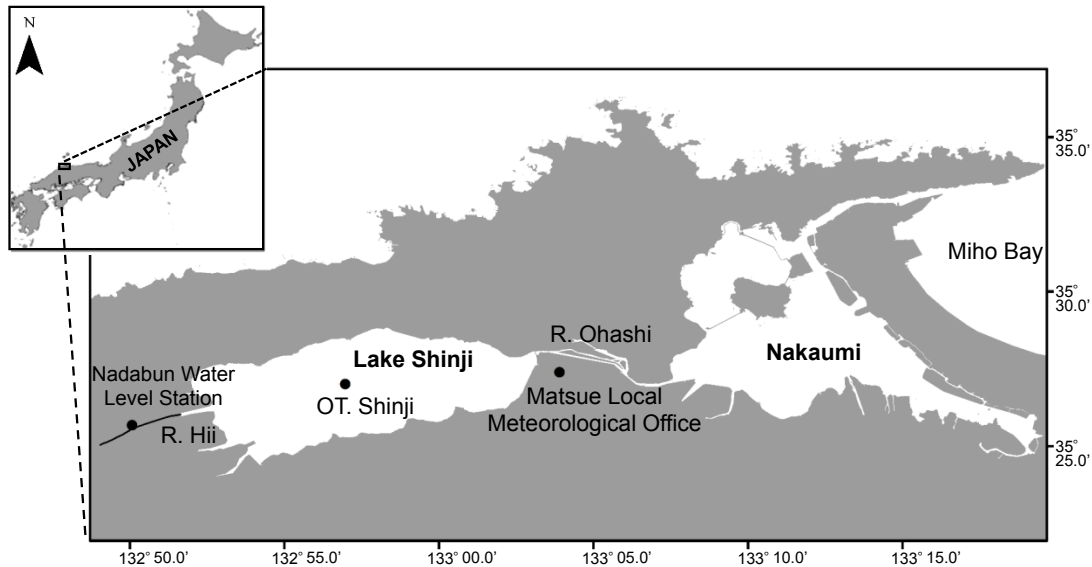


図1 宍道湖湖心における自動水質測定装置の位置.

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

約 20 本の河川があり、主な流出河川は、中海へ流れる大橋川と日本海へ流れる佐陀川がある。

宍道湖～大橋川～中海は日本にも数少ない連結汽水湖である。その中で、宍道湖は 2005 年 11 月 8 日に、中海と共にラムサール条約に登録され、コハクチョウやマガンなどの水鳥の西日本有数の渡来地になっているなど、生物多様性の豊かな自然環境で注目されている。また、宍道湖は日本一を誇るヤマトシジミの生産地である。しかし、近年の宍道湖では、アオコや貧酸素水塊の発生などの水環境問題が確認されている。特に、夏季に貧酸素水塊がしばしば確認されており、その原因としては、中海からの海水の貫入に伴う塩成層の形成や夏季の水温上昇に伴う酸素消費の増大の影響などが指摘されている(福岡ほか, 2005; 藤井ほか, 2006)。また、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」を引き起こす(増木ほか, 2013)。金ほか(2020)は、今後、気候変動に伴う斐伊川～宍道湖～中海～美保湾までの連結汽水湖における水環境の予測に貢献できる基礎的な知見を得るため、中海の湖心で測定された長期間の水質データを用いて解析を行い、中海の長期間の水質変動特性を明らかにした。それに続き、本研究では、宍道湖の水質の長期間変動特性を様々なデータから明らかにする。

方法

1. 水質データ

国土交通省(OT. Shinji)が運用している観測タワー(図1,北緯:35度27分01秒,東経:132度56分58秒,水深:約 T.P.-5.36 m)で測定された水質データ(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。期間は 1993 年 1 月から 2018 年 12 月までの約 25 年間であり、項目は表層(T.P.-0.3 m),上層(T.P.-0.8 m),中層(T.P.-2.8 m),下層(T.P.-4.76 m),底層(T.P.-5.06 m,湖底から 30 cm)の 5 層における水温,塩分濃度,溶存酸素濃度(以下 DO)の毎時データを用いた。

2. 気象および河川データ

図1に示す松江地方気象台(Matsue Local Meteorological Office,北緯:35度.27.4分,東経:133度03.9分,気象庁データベース)における 1993 年 1 月から 2018 年 12 月までの約 25 年間の毎時と毎日データを用いた(気象庁,2019)。利用した項目は、気圧(hPa),降水量(mm),気温(°C),湿度(%),風向・風速(m/s),日照時間(h)である。また、河川データは、主要な宍道湖への流入河川である斐伊川の流量データを利用した(国土交通省水文水質データベース)。しかし、斐伊川の天津観測所のみ 1993 年からのデータがあるものの、そのデータの計測方法に問題が指摘されているため、宍道湖にもっとも近い観測所であ

る灘分 (Nadabun, 北緯 :35 度 25 分 41 秒, 東経 :132 度 50 分 04 秒, T.P. 1.804 m) の 2002 年から 2018 年までの流量データも共に利用した。

3. 密度成層度 (Stratification Index, SI) の算出

金ら (2020) が地中海の水質評価のために活用した SI を宍道湖でも同様に利用するため, 鉛直の密度成層度を算出した (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に浅いため一定値) に基づいて算出した (UNESCO, 1981). 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. 特に, 水温成層と塩淡成層の影響をそれぞれ考慮するため, SI の式から水温成層度 (HSI) と塩淡成層度 (SSI) を算出した (Kim et al., 2018).

4. 機械学習モデルの概要

機械学習 (Machine Learning) は, ビックデータからパターンおよび相関性を統計的に識別するデータマイニングに基づいて, 学習アルゴリズムを用いて知識を抽出し, それから予測を行う手法である. 本研究では, 教師あり学習の中で, Random Forest (RF) を使用した (金ら, 2019). なお, モデルを構築するため, Python 上のオープンソース機械学習ライブラリー scikit-learn を使用した. 底層の DO に対して水質・気象現象が及ぼす影響を明らかにするため, それぞれ機械学習モデルを構築した. 影響因子として, 底層の水温・塩分と松江の気象 (気圧, 海面気圧, 降雨量, 湿度, 風速) や灘分及び大津の河川流量を選択した. また, それぞれの影響因子のタイムラグの影響を考慮するため, すべての独立変数について, 7 日前まで 1 日毎にシフトしたデータを加えた. DO モデルで利用した変数が両方ともタイムラグを含めて 80 個であり, エラーを除いた各変数におけるデータ数は 4179 個である. 一方, モデル性能の向上のため, グリッドサーチ法によるハイパーパラメータチューニングを行った. 2002 年から 2018 年の中で, 80% をトレーニングデータ, 20% をテストデータとしてランダムにデータを分割し学習を行った. さらに, モデル性能の確認のため,

全データと得られたハイパーパラメータを用いて K-Folds Cross Validation Method による交差検定を行った. 交差検定の回数 (K) は 5 回とした. なお, 底層の水温と塩分に対する影響因子として, 松江の気象データ (気圧, 海面気圧, 降雨量, 湿度, 風速) と灘分及び大津の河川流量を選択した. また, それぞれの影響因子のタイムラグの影響を考慮するため, すべての独立変数について, 7 日前まで 1 日毎にシフトしたデータを加えた. 水温と塩分モデルで利用した変数が両方ともタイムラグを含めて 64 個であり, エラーを除いた各変数におけるデータ数は 4316 個と 4350 個であった. 一方, モデル性能の向上のため, グリッドサーチ法によるハイパーパラメータチューニングを行った. 2002 年から 2018 年の中で, 80% をトレーニングデータ, 20% をテストデータとしてランダムにデータを分割し学習を行った. さらに, モデル性能の確認のため, 全データと得られたハイパーパラメータを用いて K-Folds Cross Validation Method による交差検定を行った. 交差検定の回数 (K) は 5 回とした.

結果と考察

1. 宍道湖心における溶存酸素濃度 (DO) の変動特性

図 2 は, 1993 年から 2019 年までの宍道湖湖心における下層と底層の DO の日平均値を示す. 宍道湖湖心の底層 (湖底から 30 cm) における DO は, 約 0.0 ~ 15.4 mg/l の範囲で変動しており, DO が 2 mg/l 以下の貧酸素水塊 (Diaz and Rosenberg, 2008) が発生したのは, 欠損値を除いた総データ数 (169,421 時間) のうち約 35,338 時間 (25 年間で約 48%) であった. 一方, 宍道湖湖心の下層 (湖底から 60 cm) における DO は, 約 0.0 ~ 16.2mg/l の範囲で変動しており, DO の 2 mg/l 以下は, 総データ数 (168,540 時間) のうち約 13,298 時間 (25 年間で約 8%) であり, DO の 1 mg/l 以下は, 8058 時間であった. したがって, 宍道湖の貧酸素水塊は, 湖底付近の薄い層 (底成層) において, 貧酸素・無酸素化の水塊を頻繁に形成していると判断された. さらに, 宍道湖の下層と底層における DO は, 春季から夏季に減少し, 秋季から冬季に増加 (回復) する傾向が確認された.

2. 宍道湖心における水温と塩分の変動特性

図 3 は, 1993 年から 2019 年までの宍道湖湖心における表層と下層の水温差 (上図) 及び表層・下

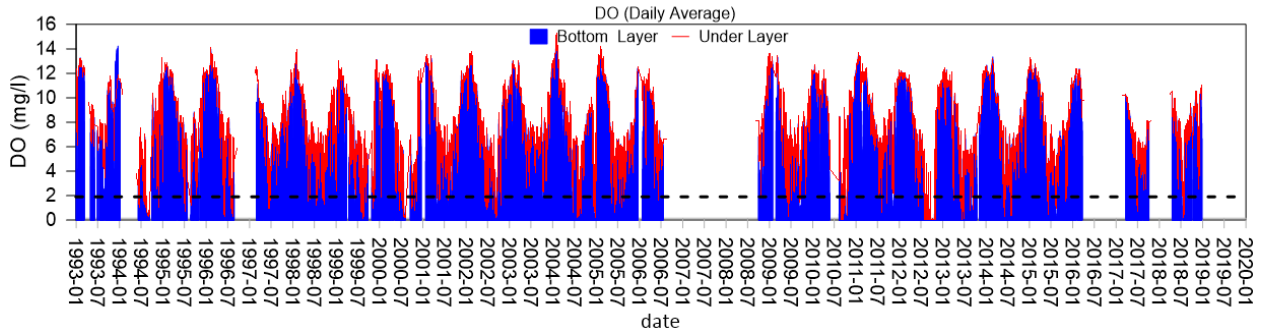


図2 宍道湖湖心の下層と底層における溶存酸素濃度.

Fig. 2 Variation of Dissolved Oxygen (DO) in the lower layer and the bottom layer of Lake Shinji.

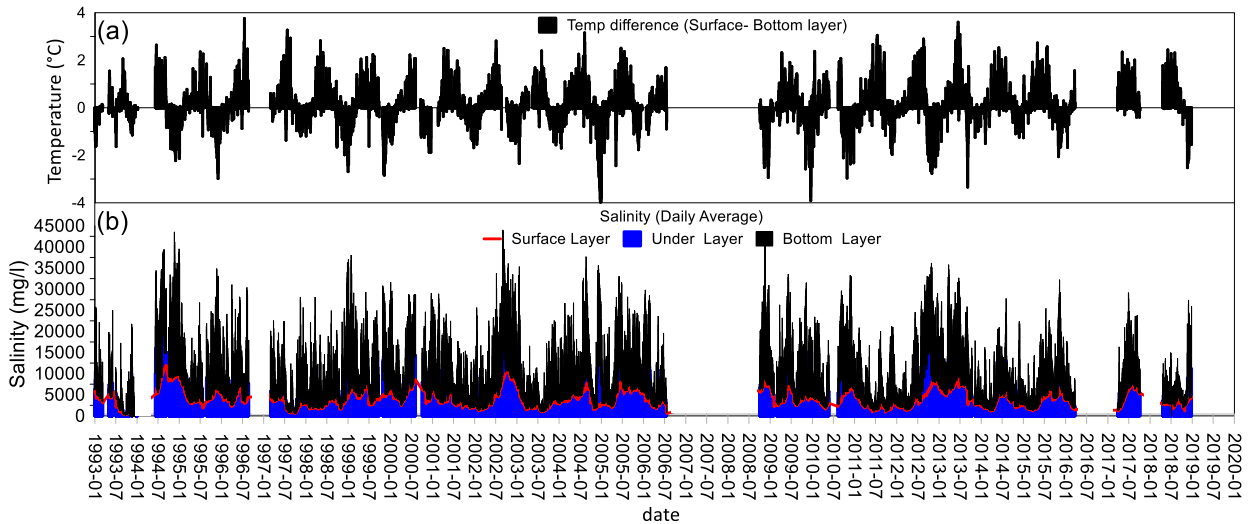


図3 宍道湖湖心の表層と底層の水温差 (a) と表層・下層・底層の塩分濃度 (b).

Fig. 3 The surface / bottom temperature difference (a) and salinity of the surface layer, lower layer, and bottom layer (b) in Lake Shinji.

層・底層における塩分(下図)の日平均値を示す。宍道湖の水温差は、春季から夏季に正になり、秋季から冬季までは負になる傾向がある。特に、水温差は、7月が最も大きく、12月が最も小さい値を示す。また、頻度解析の結果、表層水温(°C)は、平均(16.84)、標準偏差(8.40)、分散(70.6)であることに對し、底層水温は、平均(16.75)、標準偏差(8.07)、分散(65.12)であった。これは、表層と下層の平均水温には大きな差はないものの、表層水温の方が分散と標準偏差値が大きいため、水温が底層より大きく変動していることを意味する。したがって、宍道湖の水温成層の形成には、表層水温の変動の寄与が大きいと判断される。つまり、

夏季に水温差の正値が大きくなるのは(水温成層)、日射や気温増加に伴う表層の水温増加が大きく影響し、冬季の負の水温差(逆水温成層)は、表層の冷却による影響が大きいと考えられる。

一方、図3に示すように、宍道湖の塩分は、季節による大きな変動特性は見られなかった。しかし、表層と下層は差がほとんどなく、底層と表層・下層の差は大きい傾向がある。これは、湖底付近の薄い層(底成層)で中海からの海水の貫入が影響を及ぼしていると判断される(福岡ほか, 2005; 藤井ほか, 2006)。

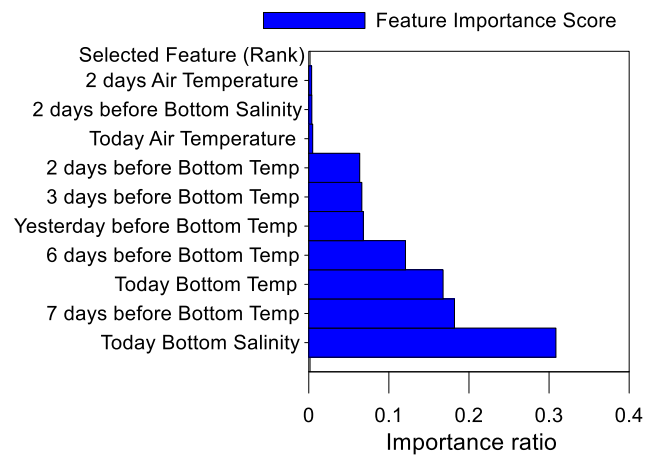


図4 宍道湖湖心の底層 DO 変動に対する特徴量選択 (Feature Selection) の結果.
 Fig. 4 Result of the feature selection for bottom layer DO fluctuations in Lake Shinji.

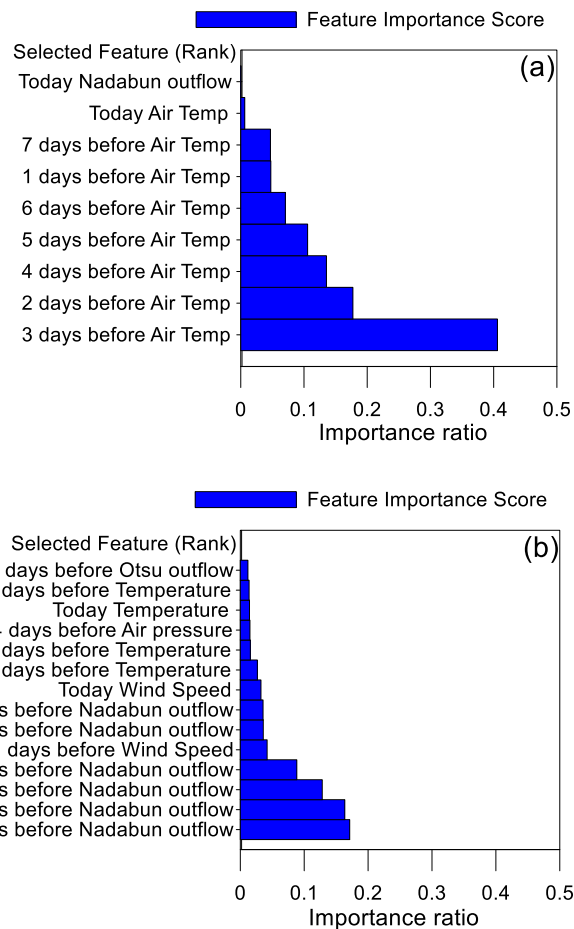


図5 宍道湖湖心の底層水温(a) と底層塩分(b) の変動に対する特徴量選択 (Feature Selection) の結果.
 Fig. 5 Result of the feature selection for a bottom layer temperature (a) and salinity (b) fluctuations in Lake Shinji.

表 1 宍道湖湖心の底層 DO と水質に対する重回帰分析結果 .

Table 1 Result of the multiple regression analysis between bottom layer DO and influential factors.

Model	B	β	t	Sig	VIF
(Constant)	14.219		248.129*	.000	
Bottom Temperature	-.296	-.641	-101.969*	.000	1.230
Bottom Salinity	.000	-.499	-76.331*	.000	1.332
Temperature Difference	-.111	-.026	-3.596*	.000	1.624
SSI	.022	.028	4.521*	.000	1.234
HIS	-.731	-.091	-13.676*	.000	1.390

Dependent Variable: Bottom DO, *p<0.01, R²=0.782

3. 宍道湖湖心における水温及び塩分と底層 DO の関係

底層 DO の変動に対する影響因子を明らかにするため、底層水温、底層塩分、水温差（表層 - 底層）、塩淡成層度、水温成層度を独立変数とし、重回帰分析を行った。その結果、表 -1 に示すように、 $p < 0.01$ および $R^2 = 0.78$ であり、この回帰モデルは、有意なモデルであると判断された。また、従属変数に対する独立変数の VIF がすべて 10 以下であり、多重共線性にも問題はなかった。特に、標準偏回帰係数 (β) から、底層 DO は、底層水温 (-0.641) と底層塩分 (-0.499) に影響を大きく受けており、水温差 (-0.026) と水温成層度 (-0.091) に負の影響及び塩淡成層度 (0.028) に正の影響を多少受けていると判断される。機械学習から構築した底層 DO モデルの R^2 は、トレーニングでは 0.805、テストでは 0.773 であった。また、宍道湖湖心の底層における DO 変動に対する影響因子の寄与度を把握するため行った、特徴量選択 (Feature Selection) の結果を図 4 に示す。底層 DO の変動に対して、大きな特徴量は、今日の底層の塩分、7 日前の底層水温、今日の底層水温の順であるため、底層塩分と水温が底層 DO に大きく影響をしていることが機械学習モデルでも確認された。したがって、宍道湖湖心における底層 DO の変動は、底層の水温と塩分の変動に大きく関係しているため、底層の水温と塩分の詳細な変動特性を明らかにする必要がある。

4. 底層の水温および塩分と気象条件の関係

底層の水温および塩分に対して気象条件や河川

流入量が及ぼす影響を明らかにするため、それぞれ機械学習モデルを構築した。その結果、水温モデルの R^2 は、トレーニングでは 0.986、テストでは 0.979 であり、塩分モデルの R^2 は、トレーニングでは 0.531、テストでは 0.434 であった。

宍道湖湖心の底層における水温と塩分変動に対する重要な影響因子を把握するため、特徴量選択 (Feature Selection) を行った。図 5 に、水温 (上図) と塩分 (下図) に影響を及ぼす上位 10 個の因子のランクを示す。水温の場合、主に気温の影響を大きく受けていると判断された。特に、3 日前の松江における気温が最も大きな影響因子であった。一方、塩分の場合、灘分における出水量に大きく影響を受けており、特に 7 日から 4 日前までの間の灘分の流量が大きい環境因子であった。

ま と め

本研究では、宍道湖湖心における水質の変動特性を明らかにするため、1993 年～2018 年の 25 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、宍道湖湖心の湖底付近の薄い層 (底成層) において、貧酸素・無酸素の水塊を頻繁に形成しているのが長期間のデータ解析においても再確認された。なお、宍道湖の下層と底層における DO は、春季から夏季に減少し、秋季から冬季に増加 (回復) する傾向があった。特に、宍道湖湖心の底層 DO の変動は、底層の水温と塩分の変動に大きく関係していた。一方、機械学習モデル (Random forest) で構築したモデル解析の結果、底層の水温は、主に気温の影響を大きく受けており、底層の塩分は、7 日から 4 日前まで

の間の斐伊川(灘分)の流量に大きく影響を受けていることが確認された。宍道湖の貴重な水産源である、ヤマトシジミの生存には、高水温(28~30℃)・低いDO(1mg/l以下)の水質状況が大きく影響するため(中村ら,1997),今後、水温が高くなる夏季に発生する貧酸素水塊に注目する必要がある。また、中海から宍道湖へ流入する高塩分水によって形成される密度成層が貧酸素化に及ぼす影響を究明するため、現地調査を行う予定である。さらに、本研究で機械学習から構築した水質モデルを改良し、気候変動に伴う気温変化の影響を含む斐伊川~宍道湖~中海~美保湾までの連結汽水湖における水環境の予測を行う予定である。

謝 辞

宍道湖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.
- 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.
- Scikit-learn Machine Learning in Python : <https://scikit-learn.org/stable/>
- 環境省・湖沼技術研究会(2008)平成19年湖沼における水理・水質管理の技術, www.mlit.go.jp (2020年1月閲覧)
- 国土交通省・国土地理院(2021)令和3年全国都道府県市区町村別面積調, 国土地理院技術資料 E2-No.73.
- Kim, S.Y., Hayami, Y., Tai, A. and Tada, A. (2018) The mechanism of bottom water DO variation in summer at the northern mouth of Isahaya Bay, Japan. *Journal of Oceanography* 74: 595–605.
- 金 相曄・藤井直紀・濱田孝治(2019)機械学習を用いた沿岸海域における赤潮予測. *土木学会論文集 B1(水工学)*, 75: I_781–I_786.
- 金 相曄・濱田孝治・南 憲吏・清家 泰(2020)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. *LAGUNA(汽水域研究)*, 27: 33–40.
- 気象庁データベース: <https://www.jma.go.jp> (2020年6月時点)
- 国土交通省水文水質データベース: <http://www.river.go.jp/> (2020年6月時点)
- 中村幹雄・品川 明・戸田顕史・中尾 繁(1997)ヤマトシジミの貧酸素耐性. *水産増殖*, 45: 9–15.
- 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.
- 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.