

# 湖山池湖口における塩分フラックスの特性

森 明寛<sup>1\*</sup>・成岡朋弘<sup>1</sup>・日置佳之<sup>2</sup>

## Characteristics of the salinity flux at the mouth of Lake Koyama-ike

Akihiro Mori<sup>1\*</sup>, Tomohiro Naruoka<sup>1</sup>, Yoshiyuki Hioki<sup>2</sup>

**Abstract:** Seawater backflow from the Sea of Japan is controlled by operating the flood gate on the Koyama River between the Sea of Japan and Lake Koyama-ike, a brackish lake in the Sanin region. An attempt was made to evaluate the salinity flux at the mouth of Lake Koyama-ike quantitatively, focusing on the effect of salinity on the ecosystem of the lake. The salinity and flow rates were monitored using electrical conductivity loggers and Doppler flow meter readings obtained every 10 min at various depths from August 8, 2021 to October 21, 2021. Based on the observed results, the salinity flux at the mouth of Lake Koyama-ike was estimated to be 0.09–5.82 kg/m<sup>2</sup>/s into the lake. When the salinity flux was high, the water level difference between the lake and the downstream site of the flood gate was large, the opening of the flood gate was large, and the salinity concentration was high at the downstream site of the flood gate. However, the results suggest that when the salinity flux is small, the flood gate opening is small, salinity concentration at the downstream site of the flood gate is low, and backflow time tends to be short.

**Key words:** Brackish water, Artificial modification, Flood gate, Lake Koyama-ike, Salinity flux

### はじめに

汽水湖は陸域から海域への移行部に存在するため、その環境は陸域および海域の双方から影響を受けやすい。陸域からは有機物や栄養塩類などの汚濁

負荷が流入し、潮汐の影響を受け外海との物質交換が行われる（國井ほか、1993）。このような特性から、汽水湖の湖口周辺などの海水流入部で人為改変が行われる場合、湖内環境はその影響を強く受けやすい。日本の汽水湖の多くは、20世紀に水門や堤

<sup>1</sup> 鳥取県衛生環境研究所・Tottori Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science, 526-1 Minamidani, Yurihama, Tottori 682-0704, Japan

<sup>2</sup> 鳥取大学農学部・Faculty of Agriculture, Tottori University, 4-101 Koyama-cho Minami, Tottori, Tottori 680-8533, Japan

\* Corresponding Author

受付日：2022年12月16日，受理日：2023年3月13日，WEB掲載日：2023年4月19日

防建設などの人間活動によって大きく改変されてきた (Nomura, 2003). かつて汽水湖であった霞ヶ浦、八郎潟などでは河口堰き止めにより現在では淡水化され (山室, 2020; 近藤, 2020), 一方、諫早湾では湾口部を堰き止めて一旦淡水化されたのち再び湾口部を開放し汽水環境に戻される事例 (東・佐藤, 2020) など、日本各地の汽水湖で塩分環境が人為的に変化した事例がある。

鳥取県東部に位置する湖山池は、古来より漁業の場および農業用水の水源として利用されており、過去に幾度も人為改変されてきた (Nomura et al., 2009). 湖内の塩分環境に影響を与えたと考えられる人為改変を整理すると、まず流出河川である湖山川への水門設置が挙げられる。この水門は 1936 年に農業の塩害防止のために設置された (鳥取県・鳥取市, 2020). この水門は 1963 年には木製から鋼鉄製の水門に更新され、現在の形となった。さらに 1983 年には湖山川の河口部を千代川から切り離す河口付け替えにより、湖山川は千代川を経由することなく直接日本海と繋がることとなった。しかし、その直後に大量の海水が湖山池に流入し、農業への塩害が発生したため、その後の湖山池の塩化物イオン濃度は 330 mg/L 以下となるように水門操作によって厳格に管理されることとなった (鳥取県・鳥取市, 2020). ところが、その後は長年にわたりアオコが顕在化し、さらにヒシの大繁茂や漁業不振などが生じた。こうした背景の中、汽水湖再生の機運も高まって、農業者との合意のもと、2012 年以降は水門の開度を上げ、塩化物イオン濃度 2,000 ~ 5,000 mg/L の範囲で管理されることとなった (鳥取県・鳥取市, 2020).

こうした海水流入部での人為改変は汽水湖の塩分環境を変化させるが、塩分は浸透圧による直接的な効果だけではなく、水質と種間相互作用を介した間接的な効果を通じて汽水湖の生物相に大きな影響を与えることが指摘されている (宮本, 2004). そのため、汽水湖へ流入する海水の流動や塩分量を把握することは、汽水湖の生態系を理解する上で重要な視点となる。

湖山池では高塩分化を始めた 2012 年およびその翌年は、目標とする塩化物イオン濃度を大きく上回る 8,000 mg/L 程度 (約 14.5 PSU に相当) まで上昇し、湖山池は過去 100 年で経験のない高塩分環境となった (鳥取県・鳥取市, 2020). 高塩分化の始まった 2012 年には、淡水性のカラスガイ *Cristaria plicata* をはじめとするイシガイ科 Unionidae の二枚貝や淡水性の水生植物などが消失した (宮本ほか, 2015 ;

永松ほか, 2014 ; 鳥取県・鳥取市, 2020). このうち、カラスガイは 10 PSU 以上の塩分環境では生息できず (伊藤ほか, 2017), 淡水性の水生植物では 12 種のうち 10 種までは 10 PSU 以上では繁茂できないとされている (山室, 2014). このように湖山池では過剰な塩水遡上により湖内の生態系に大きなダメージを与えられたと考えられており、その後もこれらの生物の回復には至っていない (鳥取県・鳥取市, 2020). このような状況の中、湖山池の生態系を再生し、期待されるさまざまな生態系サービスを楽しむようにするためには、湖水の流動性を高め、過度な塩水遡上が起きないようにすることが適応であると指摘されている (日置, 2020). そのためにも湖内へ遡上する塩分量やその特性を把握することは重要な知見となる。

海域からの塩水遡上に関しては気象や水文などの様々なプロセスが関与する。例えば、世界最大級の汽水湖であるバルト海では秋に継続した東風の後に数十日にわたる強い西風によってカテガット海峡を通じて高塩分水塊が流入する (Stigebrandt, 1983). また、ラムサール湿地のチリカ湖ではモンスーン中の海水の潮汐流入は陸域からの大量の淡水流入によって阻止されるが、夏季に湖の水位が低くなるとベンガル湾からの塩水侵入が増加する (Sarkar et al., 2012). 国内の事例では、宍道湖 (Ishitobi et al., 1999), 小川原湖 (西田・中辻, 1999) での実測において、感潮域の流速は 2 地点の水位差すなわち水面勾配によってほぼ決定されることが示されている。同様に十三湖においても水位差と実測流速より算出した流量との相関があるとしている (Pracoyo ほか, 2010). また、宍道湖に遡上する塩水の特徴として、水位差が大きくなると同時に強い西風が継続することで塩分躍層の内部振動によって下流の中海から塩水遡上が発生しやすい傾向があるとしている (森脇ほか, 2003 ; 福岡ほか, 2004). さらに網走湖では湖の水位と潮位との水位差と遡上する塩分通過量に相関があることを報告している (池永ほか, 1998). ただし、これらの事例は水門等による水の流れが制御されない条件下での調査であり、現在水門操作によって流動が制御されている湖山池とは状況が異なる。湖山池ではこれまでの湖内の塩分分布に関する調査で、日本海の潮位が高くなる夏季を中心に湖山川を通じて湖内へ海水が流入し、湖内に流入した高塩分水塊は底層を這うように反時計回りに湖内の最深部に到達する傾向があることがわかっている (湯原, 1957 ; 初田ほか, 2012 ; 森ほか,

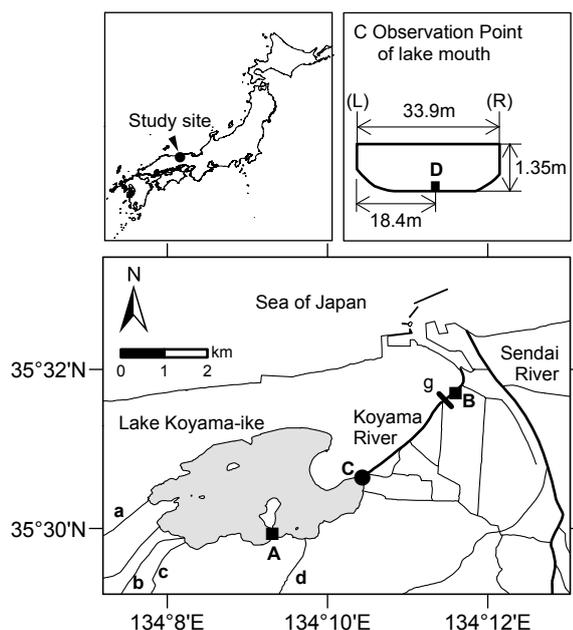


図1 調査地の位置図と観測地点。A 湖山池（青島地点）、B 水門下流地点、C 観測地点、D ドップラー流速計、g 水門、(L) 湖山川の左岸、(R) 湖山川の右岸、a 福井川、b 長柄川、c 枝川、d 三山口川。

**Fig. 1** Location of the study site and the observation point.

A Lake Koyama-ike (Aoshima site), B Downstream site of the flood gate, C Observation point of lake mouth, D Doppler flow meter, g flood gate, (L) The left bank of Koyama River, (R) the right bank of Koyama River, a Fukui River, b Nagara River, c Eda River, d Miyamaguchi River.

2013)。しかし、海水遡上量に関する実測データは無く、定量には至っていない。そのため、本研究では汽水湖の生態系に大きな影響を及ぼす海水遡上に注目して、水門で海水遡上の制御をしている湖山池を対象に、流速および塩分濃度の実測により湖口における流動量および塩分フラックスの定量を試み、その特徴を明らかにすることを目的とした。

## 調査地概要

湖山池は鳥取県東部に位置する湖岸延長 17.5 km、湖面積 6.81 km<sup>2</sup>、平均水深 2.8 m、最大水深 6.5 m、流域面積 38.91 km<sup>2</sup> の潟湖である（図 1）。主要な流入河川には、長柄川、福井川、枝川および三山口川があり、池の湖口には唯一の流出河川である湖山川

を通じて日本海へと繋がっている。その他に湖山池および湖山川には千代川から導水した農業用水路が分岐して小さな水路として接続し、その一部は接続部に樋門が設置されている。また、湖山川では河口部に水門が設置されて以降、日本海から遡上する海水の流れが抑制されており、現在の湖山水門は川幅 25 m に設置された 3 枚のゲートが独立に操作できる構造となっている。その管理方法は、順流時は幅 10.25 m の第 1 および第 2 樋門の一部と幅 4.5 m の舟通水門の一部または全部を開放されている。一方、逆流時は第 1 および第 2 樋門を全閉したうえで、舟通水門については湖山池と水門下流の水位差等に応じて水門上部を開度調整し、湖山川を遡上する海水が水門上部を通水する「上越通水」を基本操作として運用されている（鳥取県・鳥取市，2020）。なお、水門管理日報（鳥取県，未発表）によると、調査期間中（2021 年 8 月 8 日～同年 10 月 21 日）の水門の開閉状況は、順流時には概ね基本操作で運用され、水門の開口面積は最大で約 69 m<sup>2</sup> であった。一方、逆流時の基本操作では、舟通水門は水門上部を 30、60、90、130 cm と段階的に開ける「上越通水」などの細かい操作によって、水門の開口面積は概ね 0～13 m<sup>2</sup> の範囲で調節されていた。ただし、8 月 29 日～9 月 29 日および 10 月 13、18 日については、逆流時の舟通水門は概ね全開で操作され、開口面積は約 10～12 m<sup>2</sup> であった。また、8 月 18 日～8 月 22 日については豪雨後の一時的な操作として逆流時においても舟通水門の全開に加えて第 1、2 樋門が全開で操作されていた。

## 方法

### 湖山池湖口の流動および塩分濃度の連続観測

湖山池湖口の流動および塩分濃度の変化を把握するため、日本海の潮位が高くなる夏季から秋季に注目し、2021 年 8 月 8 日から同年 10 月 21 日の期間に湖口の流速と塩分濃度を連続観測した。観測地点（図 1、C 地点）は湖山池と湖山川の接続部から約 50 m 下流の川幅がほぼ変化しない湖山川の直線部分の地点（幅 33.9 m、観測期間中の平均水深 1.35 m）とした（図 1）。流速観測には観測地点断面の最深部となる位置の河床に高さ 10 cm の架台を水平に設置し、その上に超音波ドップラー流速計（ザイレムジャパン社 SonTek-IQ plus）を固定した。厚さ 3 cm の流速計の上端から水面まで深度 5 cm 毎の流速を 10 分間隔で連続観測した。なお、流速計の上

端から河床までの 13 cm については観測できないため、計測できる最下層となる機器上端から 5 cm 上部の区間の流速を適用した。また、本機は左右それぞれ 60 度かつ鉛直軸より 60 度の方向にビームが照射されるものの調査地点の両岸までは届かないため、一般に抵抗を受けやすい両岸付近の流速については本調査では考慮されていない。併せて、設置した超音波ドップラー流速計の近傍に電気伝導率ロガー（HOBO 社 U24）を設置し、塩分濃度を 10 分間隔で連続観測した。なお、電気伝導率ロガーは河床から 10 cm, 30 cm, 50 cm および 80 cm の位置に 4 か所設置し、2021 年 8 月 8 日から同年 10 月 21 日まで深度別の塩分濃度を観測した。また、湖内および湖山水門下流の水位データは「鳥取県防災情報・河川情報、[http://tottori.bosai.info/tottori\\_water\\_index.html](http://tottori.bosai.info/tottori_water_index.html)（2021 年 12 月時点）」より取得した。

### 湖山池湖口における塩分フラックスの算出

まず、各観測時刻に湖口を通過した流量について、各時刻における深度別に観測した流速に、観測深度区分の断面積を乗じて深度別に通過する流量を算出した。その流量は正值を順流量、負値を逆流量として取り扱った。各深度の順流量を表層から底層まで合計した値について、各観測日の 0 時から 24 時まで積算した値を日順流量とし、同様に各深度の逆流量の積算値を日逆流量とした。

次に、各時刻の深度別の流量と各深度に対応する塩分濃度から、湖口における塩分の移動量を算出した。電気伝導率ロガーの各設置深度に対して、河床よりそれぞれ 0 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm, 40 ~ 65 cm, 65 cm ~ 表層までの 4 層に区分し、各層の塩分濃度は均一であると仮定して、各観測時刻における深度別の流量に対応する深度区分の塩分濃度を乗じて、観測地点を深度別に通過する塩分量として算出した。なお、塩分濃度の欠測がある場合は、欠測した深度に一番近い深度のデータを適用して算出した。その塩分量は正值を日本海から湖山池への塩分遡上量とし、負値を湖山池からの塩分流下量として取り扱った。各時刻の深度別の塩分流下量を表層から底層まで合計した値について、各観測日の 0 時から 24 時まで積算した値を日塩分流下量とし、同様に各深度の塩分遡上量の積算値を日塩分遡上量とした。なお、塩分濃度は 1 PSU を 1 g/kg として取り扱った。

さらに、逆流毎の湖口での海水遡上の強度を把握するため、逆流発生毎の湖口の塩分フラックスを算出した。塩分フラックスは 1 回の連続する逆流に対

して、海水遡上毎に池口を通過する塩分量を算出し、湖口の水位から計算で求めた断面積および逆流の継続時間で除して求めた。算出した塩分フラックスは水位変化に応じた湖口の断面積の変化を反映した単位面積あたりの平均的な塩分通過速度を表している。なお、逆流については、湖口で観測した各層の流速から求めた平均断面流速が負値の状態を逆流として取り扱い、平均断面流速が連続して負値となる期間を 1 回の逆流時間とした。

## 結果および考察

### 湖口の流動および塩分変化

観測期間中の湖山池湖口（図 1, C 地点）の流速、深度別の塩分濃度、湖内（図 1, A 地点）と水門下流（図 1, B 地点）の各水位および両地点の水位差の経時変化を図 2 に示す。湖山水門（図 1, g 地点）の下流地点（図 1, B 地点）は日本海と直接繋がっているため、水門下流地点の水位は潮汐の影響を受けた変動が見られると考えられる。一方、湖内（図 1, A 地点）の水位も変動が見られるものの水門下流ほどの大きな変動は見られず、その水位差（湖内水位）－（水門下流水位）は正值と負値を繰り返していた。図 2 より水門下流の水位変動は湖内の水位変化と比べて大きく変動していることから、潮位の変動がこれらの水位差を生みだし、湖山池湖口での流向を決めているものと考えられる。また、湖口での流速はその水位差に対応した傾向が見られ、宍道湖（Ishitobi et al., 1999）や小川原湖（西田ほか, 1999）などの湖沼での実測と同様の傾向が確認された（図 3）。観測期間中の断面平均流速を見ると、順流平均流速は 0.212 m/s（最大 0.585 m/s）、逆流平均流速は -0.139 m/s（最大 -0.458 m/s）であった（図 4）。逆流時に注目すると、小川原湖での実測事例（西田ほか, 1999）では、逆流平均流速を -0.28 m/s（最大 -0.91 m/s）、宍道湖の事例（Ishitobi et al., 1999）では最大約 -0.6 m/s と報告されており、調査時の湖山池では当時の小川原湖ほど海水遡上が見られず、宍道湖と同程度の海水遡上が生じていた可能性が考えられる。また、逆流時の流速から、逆流時に海水が水門から湖山池の湖口までの約 2.5 km の距離を到達するまで平均で約 5 時間、最短でも 1.5 時間程度であることが推測された。図 2 より水門下流の水位が湖内の水位を上回る状態が平均で約 5.8 時間継続する場合において、湖口での塩分濃度の急上昇が見られ、20 PSU を超える状況も確認された。これらの

湖山池河口部における塩分フラックスの特性

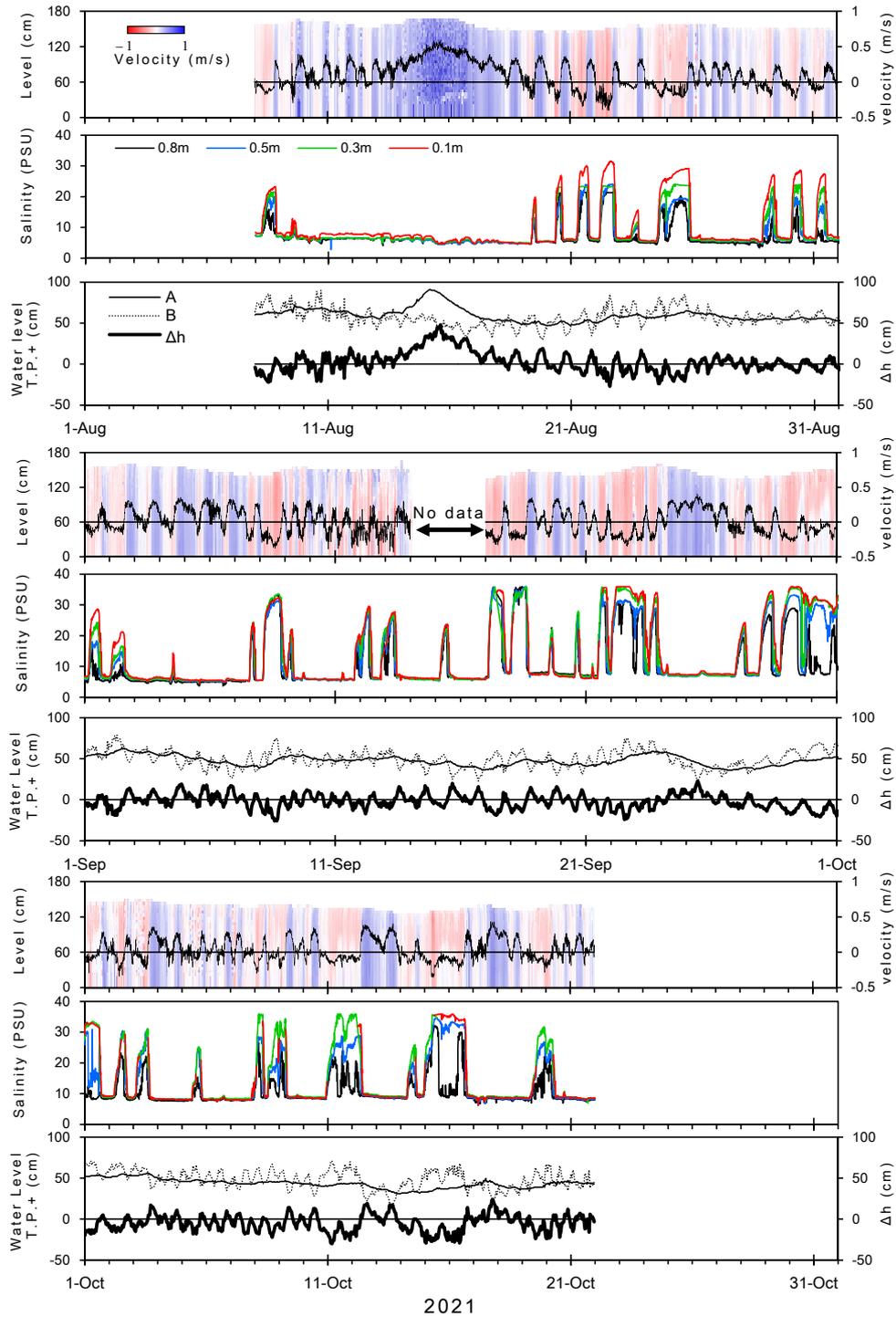


図2 湖山池の湖口における断面流速と塩分濃度および (A) 湖山池 (青島地点), (B) 水門下流の水位の経時変化 (2021年8月8日~10月21日).  $\Delta h$  は湖山池 (青島地点) と水門下流地点との水位差を表す.

**Fig. 2** Diurnal changes in cross-sectional flow velocity and salinity at the mouth of Lake Koyama-ike and water levels at (A) Lake Koyama-ike (Aoshima site) and (B) downstream site of the flood gate from August 8 to October 21, 2021.

$\Delta h$  indicates the water level difference between Lake Koyama-ike (Aoshima site) and downstream site of the flood gate.

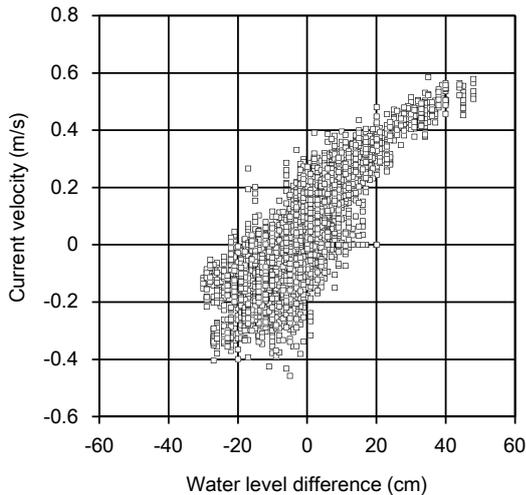


図3 湖山池(青島地点)と水門下流の水位差と湖口の平均流速との関係

Fig. 3 Relationship between the water level difference between Lake Koyama-ike (Aoshima site) and the downstream site of the flood gate and the average current velocity at the mouth of the lake.

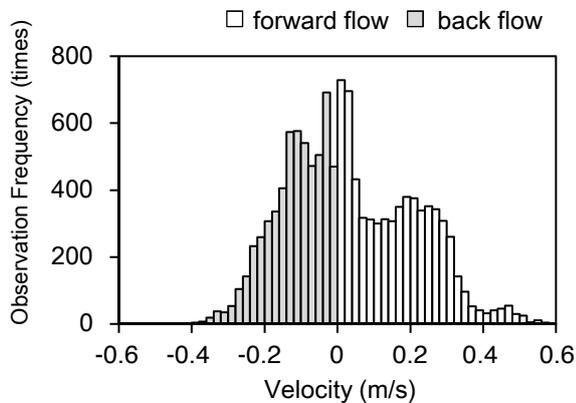


図4 観測期間中の湖山池の湖口の平均流速.

Fig. 4 Average flow velocity at the mouth of Lake Koyama-ike during the survey period.

ことから、逆流が生じて継続時間が平均で5~6時間にも満たない短いケースにあっては、海水は湖山池には到達しない、あるいは僅かしか到達せず、順流に転じた後に日本海へ流下する一方で、逆流時の継続時間が長いケースでは海水が湖内へ到達しやすい状況にあることが考えられる。

また、水深別に見ると河床に近いほど塩分が高い傾向が見られたが、9月8日のように濃度差が小さ

いケースでは湖山池に入る直前まで強混合に近い状態で海水が遡上してくる状態も確認されている。安田ほか(2019)によると2019年9月27日の現地調査において、満潮後に湖山川を遡上する海水が強混合状態に近づいていたことが確認されており、海面と湖内の水位差が大きくなる場合において、強混合状態に近づくケースが発生する可能性が考えられる。

湖口に設置した超音波ドップラー流速計で観測した流速と河川断面から算出した河川流量の日変化を図5に示す。調査を開始した8月上旬から中旬にかけて日順流量が日逆流量を大きく上回り、8月15日には逆流はなく、日順流量は観測期間で最大となる約208万 $m^3$ に達していた。この期間にはまとまった降雨が継続し、近傍の气象台湖山観測所で8月14日には128mmの降雨量を観測し、翌15日には湖山池の水位はT.P.+91cmまで上昇するとともに、湖内と水門下流との水位差は最大48cmを記録したことから極めて大きな日順流量になったと考えられる。8月下旬から9月下旬は日逆流量の多い日が増え、最大で約77万 $m^3/day$ に達した。10月になると日逆流量はやや小さくなり、最大でも約46万 $m^3/day$ に留まった。月毎の日平均流量を算出すると、日平均順流量では8月は55万 $m^3/day$ 、9月は30万 $m^3/day$ 、10月は28万 $m^3/day$ 、日平均逆流量では8月は15万 $m^3/day$ 、9月は29万 $m^3/day$ 、10月は18万 $m^3/day$ となった。水量としては日平均順流量が卓越する傾向が見られるが、特に日平均逆流量が多かった9月では日平均順流量と日平均逆流量がほぼ同量であった。

#### 湖口の塩分フラックス

湖山池の湖口を通過する日塩分量および鳥取県が観測している湖内の青島地点(図1, A地点)の塩分濃度(「湖山池塩分濃度計測システム, <http://www.koyama-lake.info/index.html> (2021年12月時点)」)の変化を図6に示す。なお、本地点では湖底から1m上部の中層の塩分濃度を観測している。調査開始後、8月中旬に湖内の塩分濃度に大きな低下が見られるが、8月13日から14日にかけての大雨(図5)が影響しているものと考えられる。その結果、湖口での流出水量の増大(図5)に伴い、湖口から流下する塩分量が大きくなったものと考えられる(図6)。その後、8月下旬には日塩分遡上量が日塩分流出量を大きく上回る状況が見られた。9月になるとその傾向が顕著となり、1日あたり1万トンを超える塩分の遡上(9月8日, 17日,

湖山池河口部における塩分フラックスの特性

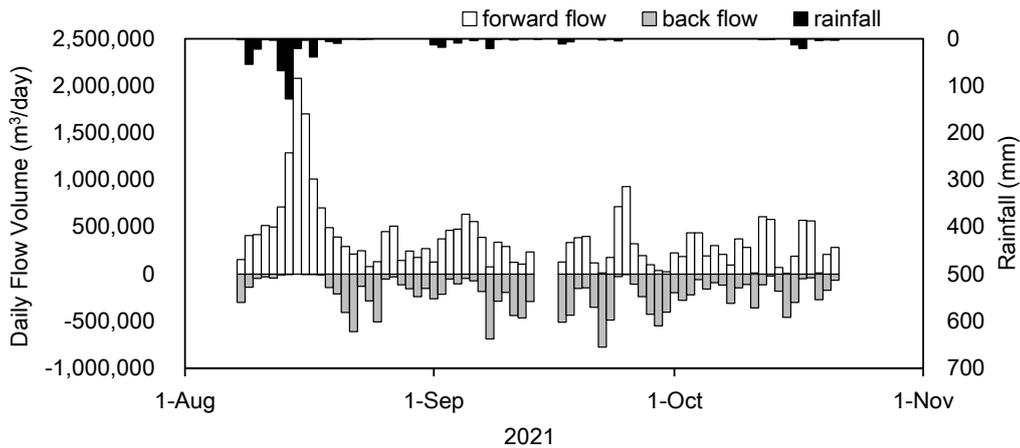


図5 湖山池の湖口における流量の日変化 (2021年8月8日~10月21日).  
 Fig. 5 Daily change in flow volume at the mouth of Lake Koyama-ike from August 8 to October 21, 2021.

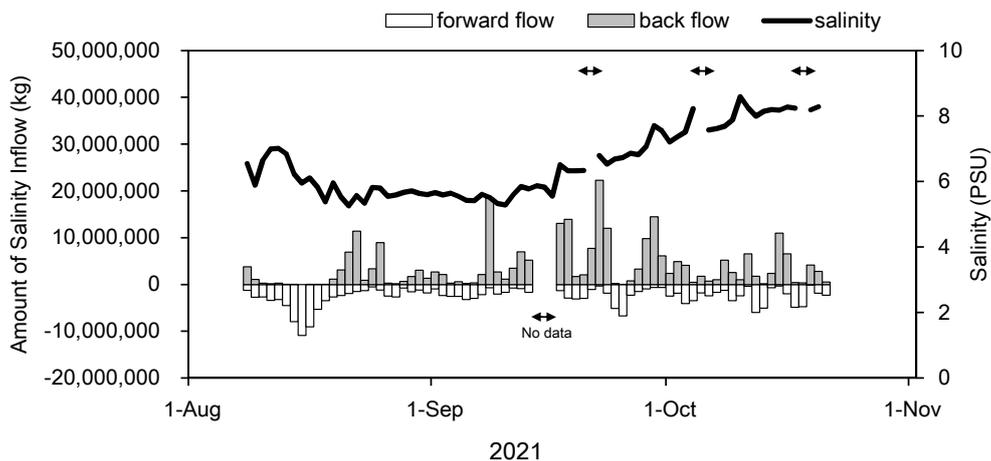


図6 湖山池の湖口における塩分流入量の日変化 (2021年8月8日~10月21日).  
 折れ線グラフは青島地点の湖底から1m上部の塩分濃度を示す。  
 Fig. 6 Daily variations in salinity inflow at the mouth of Lake Koyama-ike from August 8 to October 21, 2021.  
 The line graph shows the salinity concentration 1m above the bottom of the lake at Aoshima site.

18日, 22日, 23日, 29日) 観測され, 9月22日には観測期間で最大となる約2.2万トンの塩分が湖内へ流入した. 仮にこの塩分量が湖水で均一に混合された場合には, 湖内の塩分濃度を約1.15 PSU 上昇させるポテンシャルに相当し, 湖内の塩分環境が急激に変化する可能性を示唆している. 10月も日塩分遡上量が上回る時が幾度か見られたが, 日最大量は10月15日の約1.1万トンであった. 通常, 湖内

では塩分躍層が形成されることから, 湖内へ流入した大量の塩分は一旦深部に蓄積されるものの, その後の混合や拡散によって, 湖内の観測地点 (図1, A地点)の塩分濃度を上昇させた可能性が考えられる. また, 試算した湖口における塩分フラックスは0.09~5.82 kg/m²/s と逆流毎の塩分フラックスに大きな違いが見られた. 湖山川に設置された水門は1時間毎に人為的に開度を調整されていることから, 逆

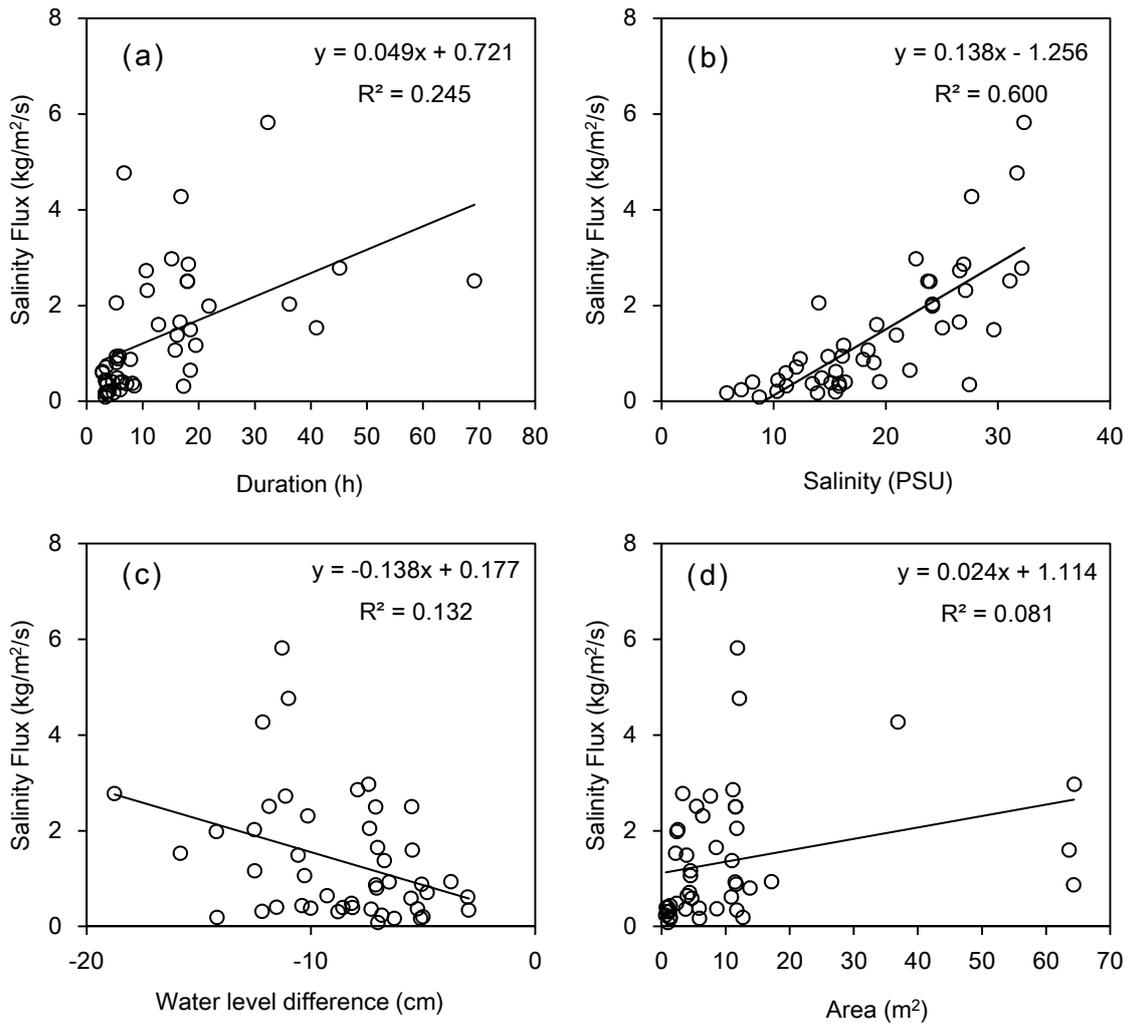


図7 逆流時の諸条件と湖山池の湖口での塩分フラックスとの関係. (a) 逆流の持続時間, (b) 水門下流の塩分濃度, (c) 湖山池と水門の水位差, (d) 水門の開口面積.

**Fig. 7** Relationship between various conditions during backflow and the salinity flux at the mouth of the Lake Koyama-ike. (a) Duration of backflow, (b) Salinity concentration at downstream site of the flood gate, (c) Water level difference between Lake Koyama-ike and the downstream site of the flood gate, (d) Opening area of the flood gate.

流時における水門の開口面積も湖口の塩分フラックスの大きさに影響を与えていることが考えられる。そのため、海水遡上に関連する項目として、逆流時における湖内と水門下流の平均水位差、逆流時間、水門下流の平均塩分濃度に加えて水門の平均開口面積にも注目し、逆流時毎のこれらの条件と湖口での塩分フラックスとの関係を示した(図7)。その結果、湖口の塩分フラックスは水門下流の塩分に弱い相関が見られたものの、その他の条件に対しては明瞭な関係が見られなかった。そこで塩分フラックスの大きさによる特徴を把握するために、クラスター

分析により塩分フラックスを類似度の近い3つのグループ(A~C)に分けた(図8)。さらにこれらのグループ毎に平均水位差、逆流時間、水門下流の平均塩分濃度、水門の平均開口面積について図9にとりまとめた。なお、分析には統計ソフトウェアR ver4.2.1 (<http://www.R-project.org/>)を使い、分類感度が良いとされるウォード法を用い、試料間の距離はユークリッド距離とした。塩分フラックスが大きなグループC(4.27~5.82 kg/m<sup>2</sup>/s)では、水門下流の塩分が27.7 PSU以上と非常に高く、通常の逆流時に操作される舟通水門は全開状態であった。また

湖山池河口部における塩分フラックスの特性

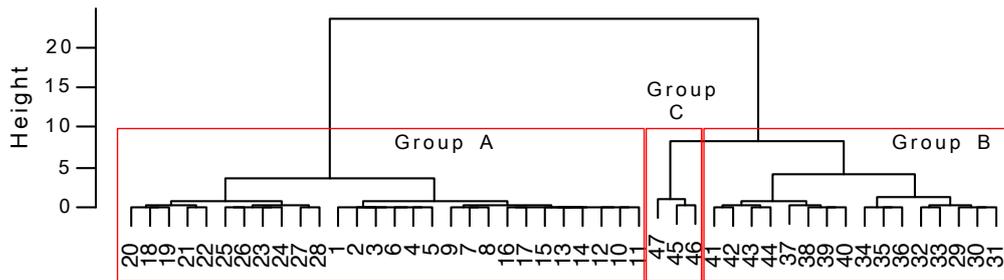


図8 クラスタ解析によるデンドログラム.  
Fig. 8 Dendrogram by cluster analysis.

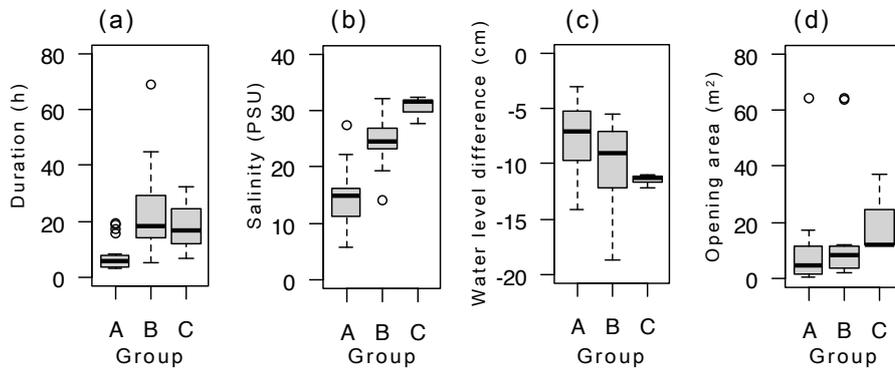


図9 塩分フラックスの各グループにおける逆流時の諸条件。(グループA: 0.09~1.17 kg/m<sup>2</sup>/s, グループB: 1.38~2.97 kg/m<sup>2</sup>/s, グループC: 4.27~5.82 kg/m<sup>2</sup>/s) (a) 逆流の持続時間, (b) 水門下流の塩分濃度, (c) 湖山池(青島地点)と水門下流の水位差, (d) 水門の開口面積.  
Fig. 9 Conditions during the backflow in each group of salinity fluxes. (Group A: 0.09–1.17 kg/m<sup>2</sup>/s, Group B: 1.38–2.97 kg/m<sup>2</sup>/s, Group C: 4.27–5.82 kg/m<sup>2</sup>/s) (a) Duration of backflow, (b) Salinity concentration at downstream site of the flood gate, (c) Water level difference between Lake Koyama-ike (Aoshima site) and the downstream site of the flood gate, (d) Opening area of the flood gate.

第1,2 樋門も開いている通常よりも開口面積が高い状態も含まれていた。さらに湖内と水門下流の平均水位差も -11.5cm と大きく、大量の塩分遡上が起こりやすい状態であったことがわかった。一方、塩分フラックスが小さなグループ A (0.09 ~ 1.17 kg/m<sup>2</sup>/s) では、水位差は -14.0 ~ -3.0 cm と広い範囲を示したが、塩分フラックスの大きなグループと比べて水門下流の塩分濃度が低く、また、大部分のケースにおいて水門の開口面積が小さく制御され、逆流時間が短い特徴が見られた。このグループにも通常の逆流時では閉じている第1,2 樋門を全開するケースが含まれていたが、いずれも水門下流の塩分濃度が低く、塩分フラックスへの寄与は小さかったものと考えられる。さらに、塩分フラックスが中間的なグ

ループ B (1.38 ~ 2.97 kg/m<sup>2</sup>/s) では、逆流時間は塩分フラックスが大きなグループと同程度またはそれ以上であったものの、水門の開口面積は塩分フラックスの小さなグループと同程度であり、かつ、水門下流の塩分は両グループの中間的な分布であった。また、水位差は -18.8 ~ -5.5 cm と広い範囲で観測された。3つのグループを比較すると、図7および図9で示したとおり水門下流の塩分濃度の大きさと湖口の塩分フラックスとの関連が大きいことが示唆される。

湖山池では大量の海水が湖内へ流入することによって、湖内の塩分濃度が大きく上昇し、過去に一部の淡水性生物の消滅または激減や、夏季を中心に底層の貧酸素化さらには大量の栄養塩類の溶出を招

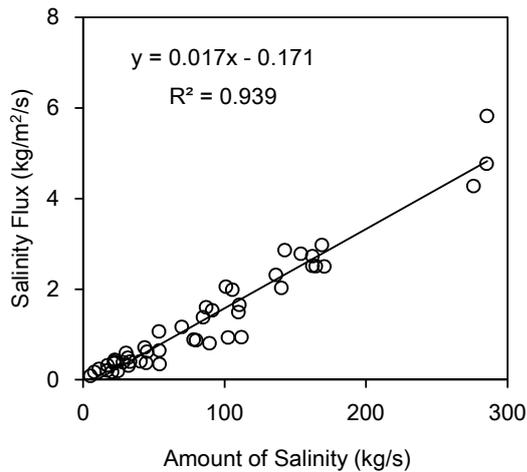


図 10 水門を通過する塩分量と湖口での塩分フラックスとの関係。

**Fig. 10** Relationship between the amount of salinity passing through the flood gate and the salinity flux at the mouth of the lake.

いたと考えられている（鳥取県・鳥取市，2020）。そのため、湖山池の淡水性生物や水質の保全する観点において、湖口での塩分流入が過大にならないことが重要であると考えられる。そのためどれだけの塩分量が水門を通過し、さらに湖口を通じて湖内へ到達するかが重要となる。そこで逆流毎に水門を通過する塩分量と湖口での塩分フラックスとの関係を図 10 に示した。なお、水門を通過する流量は観測していないため、湖山川に接続する小さな水路からの流れ込みの影響は小さく湖口における逆流量と水門での逆流量が等量であると仮定し、逆流時に水門を通過する塩分量について、逆流量を逆流時間で除して求めた流量に水門下流の塩分濃度を乗じて推計した。図 10 より、水門を通過する塩分量が大きくなるほど湖口での塩分フラックスが増大する傾向があると考えられる。ただし、水門を通過する塩分量については過大または過少評価の可能性があることから、今後水門での流速を実測するなど詳細な検証が望まれる。

#### 湖山池の今後の塩分管理に向けて

湖山池の生態系の再生を考える上で、過去に生息していた淡水性生物の保全と湖内の塩分濃度とのバランスをとることが重要となる。これらの淡水性生物を保全するには過剰な塩水遡上を防ぎ、湖内の塩

分濃度を適度に保つための水門管理をすることが重要であると考えられる。このうち逆流時の流量については水門の開度調整によって人為的に流量を制御することが考えられるが、水門を閉鎖することで流動の低下が招く水質悪化には注意が必要である。そのうえで、第 1 に水門下流の塩分濃度の鉛直分布から逆流時に表層の低塩分水塊を狙って水門上部を通過させることが有効であると考えられる。第 2 に例えば農業用水路の淡水を活用するなど、直接または間接的に湖内の塩分濃度を下げる手法の検討も有効であると考えられる。

また、世界規模で起こっている気候変動については、「人間の影響が大气、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」とし、「少なくとも 1971 年以降に観測された世界平均海面水位の上昇の主要な駆動要因は、人間の影響であった可能性が非常に高い。」と指摘されている（文部科学省・気象庁，2022）。また、気象庁が公開している潮位データ（[https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a\\_1/sl\\_trend/sl.csv](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/sl_trend/sl.csv)（2022 年 10 月時点））によると近年の日本沿岸の海面水位は上昇傾向が見られており、特に 2021 年の海面水位は統計を開始した 1906 年以降で最も高い値を記録している。特に汽水湖では海面上昇に伴って湖内との水位差による海水遡上が起こりやすくなることから、汽水湖の環境はより塩分濃度の高い状態に晒されることが考えられる。また、湖内への塩水の侵入は塩分躍層の形成を促し、底層の貧酸素化を招くとともに湖底から栄養塩類の溶出等の現象が生じることから、湖山池のみならず汽水湖の生態系を維持する視点においても気候変動に伴う海面上昇による湖内の塩分環境の変化は重要な意味を持つてくる。塩分流入量や塩分フラックスはその状態を表す重要な指標のひとつであり、今後もその状態を把握するとともに湖内の生態系に変化が生じる懸念がないか明らかにしていきたい。

#### まとめ

本研究では山陰の汽水湖である湖山池において、湖口の流速および塩分濃度を、2021 年の夏季から秋季にかけて連続観測し、湖口での流動量および塩分フラックスを定量した。その結果、湖山池の湖口では湖内と水門下流の水位差に応じて流速が変化し、観測期間の平均流速は順流方向には 0.212 m/s（最大 0.585 m/s）、逆流方向には 0.139 m/s（最大 0.458

m/s)であった。湖口の河川流量は順流量が逆流量を卓越する傾向が見られるものの、日逆流量の多かった9月の日平均流量は日平均順流量と日平均逆流量がほぼ同程度であった。湖口での塩分の移動量については、8月下旬以降は日塩分遡上量が日塩分流下量を上回る状態が多く、特に9月はその傾向が顕著となり、9月22日には湖内の塩分濃度を約1.15 PSU 上昇させるポテンシャルに相当する日量約2.2万トンの塩分量が湖内へ流入したことがわかった。また、逆流単位での湖口での塩分フラックスは0.09~5.82 kg/m<sup>2</sup>/sと試算された。このうち、塩分フラックスが大きくなる場合において、湖内と水門下流の水位差および水門の開度が大きく、さらに水門下流の塩分濃度が高い特徴がみられた。逆に塩分フラックスが小さい場合には、水位差に特徴は見られなかったが、水門開度が小さく、水門下流の塩分濃度が低く、逆流時間が短い傾向があることが示唆された。

## 謝 辞

鳥取県栽培漁業センターの清家裕室長には超音波ドップラー流速計の貸し出しおよび有益な助言をいただいた。また、査読者2名の方々には本稿に対して大変有益な助言を頂いた。ここに記して厚くお礼を申し上げる。

## 引用文献

東 幹夫・佐藤慎一(2020) 諫早湾潮止め後23年間の有明海底生動物群集の経年変化. 河北潟総合研究, 23:29-36.

福岡捷二・松下智美・岡村誠司・今村修平・船橋昇治(2004) 汽水湖に流入する塩水の流動特性. 水工学論文集, 48:1405-1410.

初田亜希子・森 貴俊・竹内 章・畠山恵介・森 明寛・宮本 康・九鬼貴弘(2012) 水門開放前後における湖山池の塩分・溶存酸素量変化. 鳥取県衛生環境研究所報, 53:55-59.

日置佳之(2020) 湖山池の汽水化事業：その現状と課題. 河北潟総合研究, 23:41-48.

池永 均・山田 正・向山公人・大島伸介・内島邦秀(1998) 網走湖の塩水化の機構と塩淡二成層の長期変動特性に関する研究. 土木学会論文集, 600:85-104.

Ishitobi, Y., Kamiya, H., Yokoyama, K., Kumagai, M. and Okuda, S. (1999) Physical Conditions of Saline Water

Intrusion into a Coastal Lagoon, Lake Shinji, Japan. Japanese Journal of Limnology, 60(4):439-452.

伊藤寿茂・柿野 亘・北野 忠・河野裕美(2017) イシガイ科淡水二枚貝の成貝6種と幼生2種の塩分耐性. 陸水学雑誌, 78:87-96.

近藤 正(2020) 八郎湖の負荷収支からみた汚濁構造と水質・水環境改善への課題. 河北潟総合研究, 23:13-24.

國井秀伸・高安克己・橋谷 博・中村幹雄・中尾 繁(1993) 汽水湖生態系の特性と日本における研究の現状. 日本生態学会誌, 43:195-209.

宮本 康(2004) 汽水湖の生物相：塩分による直接・間接的な生物相の維持. LAGUNA, 11:97-107.

宮本 康・福本一彦・畠山恵介・森 明寛・前田晃宏・近藤高貴(2015) 鳥取県における特定希少野生動物カラスガイ *Cristaria plicata* 個体群の現状：幼生と宿主魚類の関係に着目して. 保全生態学研究, 20:59-69.

文部科学省・気象庁(2022) IPCC 第6次評価報告書 第1作業部会報告書気候変動2021：自然科学的根拠政策決定者向け要約(SPM) 暫定訳(2022年5月12日版), [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_JP\\_20220512.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC_AR6_WG1_SPM_JP_20220512.pdf) (2022年9月時点).

森 明寛・初田亜希子・畠山恵介・宮本 康・九鬼貴弘(2013) 平成25年度湖山池の塩分及び溶存酸素濃度の水平分布. 鳥取県衛生環境研究所報, 54:53-55.

森脇晋平・藤井智康・福井克也(2003) 大橋川における高塩分水塊の遡上現象. LAGUNA, 10:35-45.

西田修三・中辻啓二(1999) 緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定. 水工学論文集, 43:869-874.

永松 大・高橋法子・森 明寛(2014) 鳥取市湖山池湖岸の植物群落. 山陰自然史研究, 10:15-28.

Nomura, R. (2003) Assessing the roles of artificial vs. natural impacts on brackish lake environments: foraminiferal evidence from Lake Nakaumi, southwest Japan. The Journal of the Geological Society of Japan, 109(4):197-214.

Nomura, R., Kawano, S. and Yajima, H. (2009) Brackish water thecamoebians as an indicator of sea-level changes in Lake Koyama-ike, Tottori Prefecture, southwest Japan, over last 60 years. The Quaternary Research, 48(5):305-320.

Pracoyo, A.・梅田 信・田中 仁・佐々木幹夫(2010) 汽水環境解析のための十三湖水戸口流量の推定方

- 法に関する検討. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 66(1):981-985.
- Sarkar, S. K., Bhattacharya, A., Bhattacharya, A. K., Satpathy, K. K., Mohanty, A. K. and Panigrahi, S. (2012) Chilika Lake - A Ramsar Site. In: Encyclopedia of Lakes and Reservoirs, (eds.) Bengtsson, L., Herschy, R. W. and Fairbridge, R. W. pp.148-156. Springer, Netherlands.
- Stigebrandt, A. (1983) A Model for the Exchange of Water and Salt Between the Baltic and the Skagerrak. *Journal of Physical Oceanography*, 13(3):411-427.
- 鳥取県・鳥取市 (2020) 汽水化に伴う湖山池の環境等の変化に関する調査報告書.
- 山室真澄 (2014) 日本の汽水湖沼での異常増殖が懸念される淡水産沈水植物・浮葉植物の繁茂が確認された塩分範囲. *陸水学雑誌*, 75:113-118.
- 山室真澄 (2020) 淡水化した湖としなかった湖～低塩分汽水だった霞ヶ浦と宍道湖の現状. *河北潟総合研究*, 23:49-53.
- 安田 優・山下 健・盛山哲郎・奥田英二・成岡朋弘・岡本将揮・森 明寛 (2019) 湖山池の湖内流動に関する調査. *鳥取県衛生環境研究所報*, 60:19-21.
- 湯原浩三 (1957) 鳥取県海岸湖沼の比電気伝導分布. *陸水学雑誌*, 19:29-37.