短 報 [Note]

汽水湖穴道湖における湖底堆積物からの無機栄養塩の回帰速度

菅井隆吉¹⁾・西尾正博²⁾・溝山 勇³⁾・清家 泰⁴⁾

Fluxes of inorganic nutrients from bottom sediments in the brackish Lake Shinji

Ryukichi SUGAI¹⁾, Masahiro NISIO²⁾, Isamu MIZOYAMA³⁾ and Yasushi SEIKE⁴⁾

Abstract

To clarify the fluxes of nutrients from bottom sediments in the stratified and eutrophic brackish Lake Shinji, surveys were conducted from 26 August to 1 September 2002. Investigations of the vertical distribution of nutrients were carried out at five stations in the central basin of the lake. Using a handmade water sampler with 300 ml disposable syringes, bottom waters were collected simultaneously from 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 m above the lake bottom. Water samples were analyzed for ammonia, nitrite, nitrate, and phosphate phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$). Total inorganic nitrogen (TIN) was calculated as the sum of ammonia, nitrite and nitrate. Fluxes of TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ from the bottom sediments were calculated at $49 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $7.7 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively, from temporal changes in nutrient concentrations. Thus, the N:P ratio of inorganic nutrient fluxes from the bottom was calculated at 6.4.

Keywords: nutrient fluxes, overlying water, bottom stratification, brackish Lake Shinji

摘 要

汽水湖穴道湖では、潮汐変動にともない、大橋川から高塩分水が遡上し、底層に塩分底成層を形成する。本研究では、その塩分底成層の深層（躍層以深の高塩分層）への無機栄養塩の回帰速度を明らかにすることを目的とし、現場観測を行った。300 ml 容の注射筒を用いた多層採水器を作製し、湖央部の5地点において湖底上 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 および 1.0 m の各層から同時採水した。試水中のアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素およびリン酸態リンを定量分析し、得られた無機栄養塩濃度に基づき栄養塩の現存量を計算した。現存量の変化より、湖央部における栄養塩回帰速度を算出した。このように求めた栄養塩回帰速度は、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素の和の全無機態窒素として 49

¹⁾ 公益財団法人 島根県環境保健公社 〒690-0012 島根県松江市古志原一丁目4番6号. Shimane Environment & Health Public Corporation, 1-4-6 Koshibara, Matsue, Shimane 690-0012, Japan

²⁾ 国土交通省 出雲河川事務所 〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原町5-1. Izumo River Office, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism 5-1 Enyaarihara, Izumo, Shimane 693-0023, Japan

³⁾ 国土交通省 中国地方整備局 〒730-8530 広島県広島市中区上八丁堀6-30. Chugoku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 6-30 kamihatchobori, Naka, Hiroshima, Hiroshima 730-8530, Japan

⁴⁾ 島根大学総合理工学部 〒693-0023 島根県松江市西川津町1060. Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan
(連絡先 菅井隆吉 ryusugai@nexyzbb.ne.jp)

$\text{mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, リン酸態リンとして $7.7 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。したがって, その N:P 比は 6.4 と計算された。

キーワード: 栄養塩の回帰, 直上水, N:P 比, 宍道湖

(2011 年 6 月 8 日受付; 2012 年 2 月 16 日受理)

はじめに

島根県の東部に位置する宍道湖は, 広島県との県境, 船通山に端を発する斐伊川本川から淡水流入量のおよそ 80% を受ける一方, 大橋川を通じて中海から塩水が流入する汽水湖である。中海は, 境水道を通じて外海 (美保湾) からの塩水クサビの進入を受け, 塩分による密度成層が常態化している。基本的に, 濃淡塩水の二層構造を形成し, 中海における塩水クサビは, 潮汐に伴う流動や風に伴う吹送流による運動エネルギーにより上下層が混合し, 周辺沿岸からの淡水の流入を受ける上層の低塩分層に塩分が供給される。

宍道湖への塩分の供給は, 外海の潮汐変動に伴い, 中海の水位が宍道湖の水位を上回った時, 大橋川からの塩水の遡上により日常的になされている。したがって, 宍道湖への遡上流が卓越すれば宍道湖の塩分は増加する。また, 湖周辺部からの淡水流入量が増えれば塩分は減少する。言い換えれば, 宍道湖の塩分の増減は, 大橋川の遡上量を間接的に決定する斐伊川の流量の多少に依存している。これは斐伊川の流量と宍道湖の塩分の関係を見れば明らかで, 宍道湖湖心部の塩化物イオン濃度と斐伊川流量の間には, 負の強い相関が見られる (菅井, 1988)。宍道湖では, 湖盆中央部の深部に, 潮汐変動に伴う大橋川からの高塩水が溜まることによって塩分底成層が形成される。

宍道湖においては, 塩分底成層の形成が湖底からの無機栄養塩の回帰に密接に係わっており, 湖内物質循環に係わるこれら諸要素量を明らかにしていくことは, 湖水質の短期的変動はもとより, 今後の富栄養化の推移状況を推し量る上で重要な知見を与えるであろう。

塩分底成層の形成に伴う底泥直上高塩分水中への無機栄養塩の蓄積は, その湖底直上の高塩分層の厚さが薄い (< 1 m) こともあり, 詳細な観測が困難であるが, 採水器の工夫によりその実態の一端は明らかにされている (菅井ら, 1986)。本研究においては, 考案した多層同時採水器を用い, 比較的短期間に, 迅速に, 底泥直上高塩分層内における無機栄養塩の成層状況を連続観測し,

湖底からの無機栄養塩の回帰速度を求めることを目的とした。そのために, 水深 5 m 以深の宍道湖湖中央部 (水域面積: 28.5 km^2) の代表 5 地点の観測結果に基づき, 底層水中 (湖底上 0 ~ 1 m) における無機栄養塩 (N, P) の平均現存量を求め, その経日変化に基づき, 宍道湖における夏季の平均的な回帰速度を概算した。

またさらに, その底層水の無機態 N:P 比と上層湖水の懸濁態 N:P 比を比較することにより, 塩分底成層の深層 (底泥直上の高塩分層) へ回帰した無機態栄養塩が上層へ混合拡散されたとき, N, P のどちらが湖内生産に直接的に影響するのかを考察した。

材料と方法

宍道湖の概況, 観測点および観測期間

宍道湖の表面積は 79.1 km^2 で, 東西方向約 17 km, 南北方向約 6 km, また最大水深は 6.0 m (国土交通省出雲河川事務所, 2005) である。水深 5 m の湖面の面積は 28.5 km^2 と, 表面積の 36% に当たり, その湖盆形態は比較的平坦である。大橋川からの高塩分水は, 潮汐や低気圧に伴う中海からの遡上流により, 時折, 湖底を這うように進入して滞留することにより, 塩分底成層を形成する。その湖底上の高塩分水塊は, 吹送流により水平移動するなかで攪乱され, 境界面上層水と混合し消失する。その塩分底成層の深層内は閉鎖的な空間で, DO 濃度の低下を招きやすい。

水深 5 m 以深の湖中央部において, 湖心に 1 点とほぼ東西南北に 1 点ずつ計 5 観測点を設けた (Fig. 1)。各観測点の水深は 5.3 ~ 5.6 m である。この 5 観測点において, 2002 年の 8 月 26 日から 9 月 1 日にかけて 1 日 1 回の観測を行った。

試料採取方法

考案した多層採水器を Fig. 2 に示す。下部に 5 kg の錘を付けた支柱に 300 ml 容の注射筒を 20 cm 間隔で固定する。支柱には, 船上から湖底までの深さを考慮し, ロープ①を取り付ける。一方, 細いロープ②で注射筒の

Fig. 1. Location of sampling stations in Lake Shinji.

図 1. 宍道湖における観測点.

上部をくくりつけながら上方に伸ばし支柱からのロープ①とセットにする。なおロープ②には採水時に内筒が外筒から抜けないようにトメを付けておく。採水はロープ①で本体を湖底におろし、次にロープ②を引き、注射筒に湖水を吸引する。その後ロープ①で本体を船上に引き上げ、注射筒の湖水をそれぞれポリビン中に採取した。

水質分析

試水は、ポリ瓶中に保冷して試験室に持ち帰り、ガラス繊維ろ紙 (Whatman GF/C, 平均孔径 $1.2\mu\text{m}$) で過した後、ろ液について硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), リン酸態リン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) を分析した。分析は自動分析装置 (BRAN+LUEBBE 社, TRAACS-800) によるが、アンモニア態窒素はインドフェノール青法、硝酸態窒素は銅-カドミウムカラムで還元後ナフチルエチレンジアミン法、亜硝酸態窒素はナフチルエチレンジアミン法、リン酸態リンはモリブデン青法による。なお硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素の和を全無機態窒素 (TIN) とした。

Fig. 2. Multi-layer sampler for collecting water overlying bottom sediment.

図 2. 底泥直上多層採水器.

無機栄養塩の回帰速度の算出法

塩分躍層以深の高塩分層内は、閉鎖的な空間で溶存酸素 (DO) も減少しやすく、DO 濃度が低下することによって、湖底泥からの栄養塩の溶出、特にリンの溶出促進が予想される。宍道湖深部の高塩分水塊は、強風が継続すると攪乱混合され消失するが、通常は湖央部での揺れはあるものの、大橋川からの新たな高塩水の流入に伴う横方向からの強い移流が無ければ、保存される。このことから、深部の高塩分層内の中栄養塩の現存量変化から、湖底からの無機栄養塩の回帰速度の算定は可能であると考えられる。そこで本研究では、ほぼ平坦な 5 m 以深の水域を対象に、湖底から湖底上 1 m までの水体中の栄養塩の現存量変化から、その回帰速度を求めた。

湖底から湖底上 1 m までの水体中の栄養塩の現存量は次のように求めた。

すなわち、水深 5 m における面積、 28.5 km^2 に水深 1 m を乗じ、対象とする水体の体積を $2.85 \times 10^7 \text{ m}^3$ とした。そしてこの体積に、5 観測点、各 5 層、合計 25 試料の無機栄養塩濃度の平均値を乗じ各観測日における無機栄養塩の現存量とした。

結果と考察

無機態窒素及び無機態リンの鉛直分布の推移

アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素の和である全無機態窒素 (TIN) の底層水 (湖底上 0 ~ 1 m) における鉛直分布を Fig. 3 に、リン酸態リン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) の鉛直分布を Fig. 4 にそれぞれ示す。

期間中 (8 月 26 日 ~ 9 月 1 日) TIN および $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は極めて類似した変動パターンを示した。TIN, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (以下それぞれ N, P と略す) とともに、調査初日の 8 月 26 日に、すでに湖底直上で蓄積していた。最下層の湖底上 0.2 m では、STN (N, 0.08 mg L^{-1} ; P, 0.026 mg L^{-1}) より STS (N, 0.32 mg L^{-1} ; P, 0.067 mg L^{-1}) が、また STW (N, 0.12 mg L^{-1} ; P, 0.027 mg L^{-1}) より STE (N, 0.47 mg L^{-1} ; P, 0.097 mg L^{-1}) の濃度が高く、調査初日、高濃度水塊はやや南東よりに偏って分布していたと推察される。27 日には、STN で最下層の濃度が N, P それぞれ 0.45 mg L^{-1} , 0.099 mg L^{-1} に急上昇した。一方、STS の最下層の濃度は N, P それぞれ 0.17 mg L^{-1} , 0.028 mg L^{-1} に減少、STE および STW はほぼ変わっていないことから、高濃度水塊は北側に動いたことが推察される。28 日には、STS の最

Fig. 3. Daily changes of vertical distribution of TIN in bottom water (0 - 1 m above bottom sediment) in summer, 2002.

図 3. 底層水中 (湖底 ~ 湖底上 1 m) TIN の鉛直分布の経日変化 (2002 年夏季)。

Fig. 4. Daily changes of vertical distribution of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in bottom water (0 - 1 m above bottom sediment) in summer, 2002.

図4. 底層水中（湖底～湖底上1 m） $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の鉛直分布の経日変化（2002年夏季）。

下層濃度はN, Pそれぞれ 0.38 mg L^{-1} , 0.065 mg L^{-1} に再び上昇, STN (N, 0.36 mg L^{-1} ; P, 0.067 mg L^{-1}) および STE (N, 0.40 mg L^{-1} ; P, 0.085 mg L^{-1}) では減少し, STW (N, 0.18 mg L^{-1} ; P, 0.036 mg L^{-1}) ではやや上昇していることから, 高濃度水塊は中央部に落ち着いたように見える。29日にかけて特に南西側で蓄積が進み, STO, STS および STW での高濃度水塊は湖底上1 mに達した。30日には, 高濃度水塊は, 再び南東より移動し, N, Pともにその濃度はSTWで減少する一方, STO, STS および STEの最下層では, それぞれN, 0.65 mg L^{-1} ; P, 0.084 mg L^{-1} , N, 0.66 mg L^{-1} ; P, 0.105 mg L^{-1} およびN, 0.59 mg L^{-1} ; P, 0.133 mg L^{-1} まで上昇した。9月1日には, STO および STS では依然として成層化は見られるものの, STN および STEにおいて濃度分布は減少・均一化傾向を示し, 混合が進んだことを示唆している。

無機栄養塩の回帰速度

穴道湖湖心における調査開始10日前から調査終了日（2002年8月15日～9月1日）までの水位と湖底上0.3, 0.6および4.5 mの塩分, 並びに湖底上0.3 mのDOの自動観測結果（国土交通省出雲河川事務所, 2002）をFig.

5に示す。風が強かった8月19日（平均風速 7.8 m s^{-1} ）, 8月26日（平均風速 7.9 m s^{-1} ）, 8月31日（平均風速 8.7 m s^{-1} ）には, 底層の塩分は急速に上層の濃度に近づいていることから, 塩分底成層が消失したか, 高塩分水塊が湖心部から大きくずれた可能性がある。また, 9月1日には, 湖水位が急上昇するとともに塩分の急激な増加も観られることから, 新たな高塩分水の進入を示唆する。

以上のように, 調査初日の26日は風の影響で成層が不安定な状況であったと推察されるが, 風がおさまった8月27日から30日にかけては, 水中攪乱は小さく, また水位変動も小さいことから, この間には, 新たな高塩分水の移流は無かったものと判断できる。また, 自動観測期間中（8月19日, 26日および31日を除く）, リンの溶出に影響を及ぼすDO濃度も, 湖底上0.3 m層において概ね 3 mg L^{-1} 以下と比較的低い値で推移していた。これらの観測結果は, 8月27日から30日にかけての栄養塩現存量変化に基づき, 湖底からの栄養塩回帰速度を見積もることが可能であることを示唆する。

そこで以下のように, 無機栄養塩の回帰速度を算出した。5観測点5層, 合計25試料の測定値に基づき算出した, 各観測日における各無機栄養塩の平均濃度の推移をTable 1に示す。また, 各平均濃度に, 対象水域の

Fig. 5. Time changes of salinity at 0.3, 0.6 and 4.5 m above the bottom, DO concentration at 0.3 m above the bottom, and water level at Lake Shinji observatory in summer, 2002. Distance from the bottom: B, 0.3 m; L, 0.6 m; U, 4.5 m.

図 5. 宍道湖湖心観測所における塩分（湖底上 0.3 m, 0.6 m および 4.5 m）, DO（湖底上 0.3 m）及び水位の時系列変化（モニター値）。湖底からの距離：(B), 湖底上 0.3 m；(L), 湖底上 0.6 m；(U), 湖底上 4.5 m。

湖底から湖底上 1 m までの体積, $2.85 \times 10^7 \text{ m}^3$, を乗じて得られた現存量の推移を Table 2 に示す。湖底からの回帰速度は, 現存量を縦軸にとり, その日変化をプロットした時の回帰式の傾きとして得られる。前述の理由から, 8 月 27 日から 30 日にかけての現存量の日変化をプロットし回帰式の傾きを求めた (Fig. 6)。回帰式の傾きより TIN の回帰速度は $1.4 \times 10^3 \text{ kg day}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の回帰速度は $2.2 \times 10^2 \text{ kg day}^{-1}$ と見積もられた。これより, 単位面積当たりの回帰速度を求めると, TIN は $49 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は $7.7 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ となった。したがって, その N:P 比は 6.4 と計算される。

宍道湖における底層環境は, 塩分底成層の消長にともない大きく変動することから, 宍道湖における湖底からの無機栄養塩の回帰速度も, 大きく幅を持つものと考えられる。これは特に, 密度成層にともなう嫌気層の発達によるところが大きい。DO 濃度の減少は, 特にリンの溶出に与える影響が大きい, 一方では, 底層における DO 濃度の低濃度付近での増減は, 無機態窒素濃度の消長に対しても大きく影響する (清家ら, 1986a, 1986b, 1997; Senga et al., 2001, 2002)。8 月 27 日から 30 日にかけて, DO 濃度は, 低濃度で推移しており (Fig. 5 参照), リンの溶出に正の影響を与え得る状態 (島根県, 1979) であったと推察される。

宍道湖における湖底からの栄養塩の回帰速度に関する報告例は少ないが, 神谷ら (1996) は, 約 1 ヶ月間に渡る湖心部での現場観測に基づき, リン酸態リンおよびア

ンモニア態窒素の溶出速度は, それぞれ $7.2 \sim 30.3 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ および $17.2 \sim 64.3 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であったと報告している。また同時に行った室内実験の結果に基づき, リン酸態リンはそのほとんどが堆積物からの拡散によってもたらされ, アンモニア態窒素は新生堆積物からの回帰や底層水中での懸濁有機物や溶存有機物に含まれる窒素化合物の無機化によって回帰している部分が大いといと推測している。また溶存有機リンの形態で溶出したリンの, 底層水中におけるリン酸態リンへの無機化による回帰の可能性も指摘している。

本研究では, 湖底堆積物からの溶出分と神谷ら (1996, 2001) が指摘している底層水中から回帰するものを合わせた回帰速度として, TIN が $49 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

Fig. 6. Daily changes of total amount of TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in the bottom water (0 - 1 m above bottom sediment) in summer, 2002.

図 6. 底層水中（湖底～湖底上 1 m）における TIN 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 現存量の経日変化（2002 年夏季）。

汽水湖宍道湖における湖底堆積物からの無機栄養塩の回帰速度

Table 1. Daily changes of average concentration of NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N, TIN and PO_4^{3-} -P in bottom water (0 - 1 m above bottom sediment) in summer, 2002.

表 1. 底層水中（湖底～湖底上 1 m）の NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N, TIN 及び PO_4^{3-} -P の平均濃度の経日変化（2002 年夏季）.

	NO_3^- -N	NO_2^- -N	NH_4^+ -N	TIN	PO_4^{3-} -P
	mg L ⁻¹				
8/26	0.01	0.002	0.13	0.14	0.038
8/27	0.02	0.001	0.18	0.20	0.043
8/28	0.01	0.004	0.17	0.18	0.042
8/29	0.01	0.002	0.29	0.30	0.055
8/30	0.01	0.001	0.31	0.32	0.064
9/1	0.01	0.003	0.20	0.21	0.042

Table 2. Daily changes of total amount of NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N, TIN and PO_4^{3-} -P in bottom water (0 - 1 m above bottom sediment) in summer, 2002.

表 2. 底層水中（湖底～湖底上 1m）の NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N, TIN 及び PO_4^{3-} -P 現存量の経日変化（2002 年夏季）.

	NO_3^- -N	NO_2^- -N	NH_4^+ -N	TIN	PO_4^{3-} -P
	kg				
8/26	290	60	3,700	4,100	1,100
8/27	570	30	5,100	5,700	1,200
8/28	290	100	4,800	5,200	1,200
8/29	290	60	8,300	8,700	1,600
8/30	290	30	8,800	9,100	1,800
9/1	290	90	5,700	6,100	1,200

が 7.7 mgP m⁻² day⁻¹ と推測されたが、今回の結果は、神谷ら（1996）の回帰速度の範囲に対して、窒素は中央値に、リンはやや低い値に位置する。神谷らの結果が、湖心部を対象としたものであるのに対し、本結果は、湖心部を含む 28.5 km² という広範囲に渡る平均的な回帰速度であることから、特に DO 濃度に左右されやすいリンに、その影響が表れたものと推察される。また Table 2 に示すように、TIN の現存量において、アンモニア態窒素が 89～97%を占めるが、これが、底泥からの溶出と底層水中からの回帰と、どちらの比重が大きいかは明らかではない。今後さらに室内実験もふくめた研究を重ねる必要があると考える。

回帰速度の N:P 比

無機態 N, P の湖水への負荷は、湖内生産に直結し、時に、赤潮やアオコなどの異常発生にもつながる重要な要素である（嘉藤ら、2004）。宍道湖におけるプランクトン態の N:P バランスの実態を理解するためには、植

物プランクトンの増殖に直接影響を及ぼす無機栄養塩の供給側の N:P バランスを明らかにしていくことが重要となる。宍道湖では、プランクトン体が主と考えられる上層湖水の懸濁態 N:P の質量比は、年間を通して比較的変動が小さく、平均値 7.9 であり（国土交通省出雲河川事務所、1996-2008）、一般によく知られているレッドフィールドの植物プランクトンの N:P 比 7.2 に近い値である。今回得られた無機栄養塩回帰速度の N:P 比 6.4 は、上層湖水の懸濁態 N:P 比の 7.9 よりやや小さく、この時期（8 月）、上層湖水中の一次生産につながる栄養塩負荷として、底層からの無機栄養塩負荷は、相対的に窒素負荷よりリン負荷がやや大きいことが推察された。

まとめ

比較的簡易な同時採水器を考案し、宍道湖の湖央部底層に形成される塩分底成層の深層（高塩分層）における無機栄養塩の現存量の変化に基づき、湖底からの無機態

栄養塩の回帰速度を概算した。その結果、TIN の回帰速度は $49 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の回帰速度は $7.7 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であり、回帰栄養塩の平均 N:P 比は 6.4 であった。回帰された無機栄養塩の平均 N:P 比 6.4 は、上層湖水中の懸濁物質の N:P 比の 7.9 よりやや小さく、この時期（8 月）、上層湖水中での一次生産につながる栄養塩負荷として、底層からの無機栄養塩負荷は、相対的に窒素負荷よりリン負荷がやや大きいことが推察された。

島根県（1979）：中海・宍道湖の水質保全に関する調査報告書（第 5 報）：18-25.

菅井隆吉（1986）：宍道湖における微成層の形成とその変化．陸水学雑誌，47：315-324.

菅井隆吉（1988）：汽水湖宍道湖におけるアオコの発生状況について．水，30(4)：61-65.

文献

神谷 宏・石飛 裕・井上徹教・中村由行・山室直澄（1996）：夏期の宍道湖の底層水に蓄積する栄養塩の起源．陸水学雑誌，57：313-326.

神谷 宏・石飛 裕・井上徹教・中村由行・山室直澄（2001）：富栄養化した汽水湖沼における高水温・貧酸素時の堆積物からの溶存有機態リン（DOP）とリン酸の溶出．陸水学雑誌，62：11-21.

嘉藤健二・神門利之・景山明彦・芦谷 亮・三島幸司・神谷宏・朱 根海・大谷修司・石飛 裕（2004）：水質の年間変動と植物プランクトンの C:N:P 比から見た中海における赤潮発生．陸水学雑誌，65：69-82.

国土交通省出雲河川事務所（1996-2008）：斐伊川水系水質測定結果報告書 平成 8 年～平成 20 年．

国土交通省出雲河川事務所（2005）：中海・宍道湖の水環境，平成 17 年 3 月．

国土交通省出雲河川事務所（2002）：宍道湖湖心水質自動観測所月報，平成 14 年．

清家 泰・近藤邦男・伊達善夫・石田祐三郎（1986a）：汽水湖・中海における窒素代謝Ⅱ - 夏期における底泥表層部での窒素特性．陸水学雑誌，47：133-141.

清家 泰・近藤邦男・伊達善夫・石田祐三郎（1986b）：汽水湖・中海における窒素代謝Ⅲ - 低酸素濃度下における硝化・脱窒．陸水学雑誌，47：269-278.

清家 泰・奥村 稔・藤永 薫・黒住誠司（1997）：汽水湖中海における貧酸素水塊形成時の硝化・脱窒．沿岸海洋研究，35：27-33.

Senga, Y., Y. Seike, K. Mochida, K. Fujinaga and M. Okumura (2001): Nitrous oxide in brackish Lake Nakaumi, Japan. *Limnology*, 2: 129-136.

Senga, Y., K. Mochida, N. Okamoto, R. Fukumori and Y. Seike (2002): Nitrous oxide in brackish Lake Nakaumi, Japan II: the role of nitrification and denitrification in N_2O accumulation. *Limnology*, 3: 21-27.