

汽水湖穴道湖における汚濁負荷特性に関する研究

(要約)

The characteristics of pollutant loads
in the brackish Lake Shinji.

2018

菅井隆吉

緒 言

斐伊川本川の最下流部に位置する穴道湖は、近年富栄養化が進行し、湖沼の水質保全の各種対策は進められてはいるものの、湖沼水質は必ずしも改善されている状況にない。大橋川からの遡上塩水は、穴道湖底層の貧酸素化の原因となり、底層からの栄養塩の回帰速度に大きく影響を及ぼしているが、その見積もり、及び栄養塩の回帰に及ぼす底層環境の特性評価は、必ずしも十分とは言えない。また一方で、穴道湖のような閉鎖的水域における水環境の推移を推し量る上で、流入負荷量の精度の高い算定は欠かせない基本的な事項であると考えられる。そこで、今後の湖沼水質改善のための対策に資する研究とすべく、穴道湖における汚濁負荷特性を明らかにするための調査研究を実施し、本論文としてとりまとめた。

第1章．塩分の変動要因から見た汽水湖穴道湖の流域特性

はじめに

穴道湖における最も基本的要素としての水の動きを明らかにすべく、 Cl^- 濃度の変動に注目し、 Cl^- 濃度を検証要素として、斐伊川から穴道湖、大橋川、中海、美保湾に至る下流部水域における、海水と陸水の相互の係りを検討した。

方 法

1) 対象流域

対象流域は、斐伊川本川から穴道湖、大橋川、中海、美保湾に続く斐伊川流域である。

2) 塩分

宍道湖の塩分としては、毎月一回実施している定期観測における Cl^- 濃度の分析値を使用した。分析方法は硝酸銀滴定法（モール法：JISK0102-2013 35.3）による。

3) 松江における降雨量

宍道湖における Cl^- 濃度の長期的変動要因の一つとして、宍道湖の Cl^- 濃度の長期的変動要因の項において、松江気象台における降雨量の年変化を見た。

4) 美保関における水位

長期的な Cl^- 濃度の変動要因のもう一つとして、宍道湖の長期的変動要因の項において、国土交通省の美保関水位観測所の水位観測値と、宍道湖 S3 地点における Cl^- 濃度との関係を見た。

5) 斐伊川における流量

長期的変動要因の項においては、上島流量観測所における月平均流量値の年変化、また短期的変動要因の項においては、上島流量観測所及び、新伊萱流量観測所における流量値と、宍道湖 S3 地点における Cl^- 濃度との関係を見た。

結果と考察

塩分濃度の長期的変動要因

宍道湖における年平均 Cl^- 濃度は、1990 年から 2013 年の間で、年間約 30mg L^{-1} のピッチで上昇していることが分かった。

松江気象台における年間降雨量は減少傾向にあることが分かったが、斐伊川の流量の推移を確認したところ、斐伊川の流量に、減少傾向は認められないことが分かった。

一方、美保関の海面水位は年々上昇する傾向にあり、1990 年から 2013 年の間で、年間 1.0cm のピッチで上昇していることが分かった。この海面水位の上昇は、中海底層への海水の侵入を助長しているものと考えられる。

大橋川河口地点における下層の Cl^- 濃度の年変化を見たが、1990年から2013年において、 $111\text{mg L}^{-1}\text{ year}^{-1}$ の上昇傾向にあった。これは、海面水位の上昇が、中海への塩水くさびの侵入を助長し、大橋川を通した、宍道湖への塩水濃度も上昇傾向になり、宍道湖への遡上塩分量が増加傾向となっていることを示すものである。

斐伊川における月平均流量値（上島）の変化に減少傾向は見られないことから、宍道湖における1990年以降の Cl^- 濃度の上昇は、日本海の海面水位が1990年以降、上昇傾向であることが、宍道湖の塩分濃度の長期的変動要因であると推察された。

塩分濃度の短期的変動要因

出水により斐伊川の流量が増すと、宍道湖の水位の上昇に伴い大橋川の上流側の松江の水位も同様に急増し、これによって、下流側の八幡との水位差が広がり、大橋川は順流傾向となり遡上流を生じない。この期間の松江における Cl^- 濃度の推移を見ると、 Cl^- 濃度のピークを生じていない。

宍道湖の水位が下がり、松江の水位も下がると、再び通常の往復流を生じるようになり、 Cl^- 濃度のピーク（高塩水の遡上）が見られるようになる。

宍道湖への塩分の供給は、日本海（美保湾）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に、大橋川を通した高塩水の遡上により日常的になされている。

2011年の7月のように、陸水量が多く宍道湖の塩分が低い時は、大橋川の東西両端の水位差が逆転する時間が少なく（148時間）、遡上塩水の塩分ピーク高もやや低い。

2013年の7月のように、陸水量が少なく宍道湖の塩分が高い時は、水位差が逆転する時間が多く（306時間）、加えて塩分ピーク高もやや高いことが分かった。

宍道湖の短期的な Cl^- 濃度の増減は、基本的には、大橋川における塩水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とが想定される。

近年の観測値(2003年~2013年)から、宍道湖における定期観測日にさかのぼる10日ピッチで90~70日間の新伊萱及び、上島における日流量平均値の対数と、その月のS3における Cl^- 濃度との関係を見た。

新伊萱、上島の日流量平均値の対数とS3の Cl^- 濃度との間には、ともに良い相関が得られた。

このことから、宍道湖における Cl^- 濃度の短期的な変動は、斐伊川の流量に依っていることが明確に示された。

第2章．周辺部河川からの汚濁負荷流入特性

はじめに

宍道湖に流入する斐伊川を始めとする流入河川、水路及び宍道湖西岸域における排水樋門において、水質分析のための採水と、同時に流量観測を長期間実施し、周辺部流入河川・水路からの流入負荷量を推算するための、流量と負荷量の関係式(LQ式)について検討した。また同時に、周辺からの流入負荷特性を検討し、斐伊川においては出水時における観測も重ねて実施し、出水時と平水時の負荷特性の違いについて検討した。

宍道湖流域の概況

宍道湖は、東側の中海と大橋川で繋がる汽水湖であるが、一級河川斐伊川として管理されている。斐伊川は宍道湖の西岸に流入するが、その源を島根県と広島県との県境、船通山(標高1,143m)に発し、宍道湖、大橋川、中海、境水道を経て日本海に注ぐ幹川流路延長153km、流域面積2,540km²の、島根県東部

で最も大きい河川である。

調査方法

平水時調査

本研究では，宍道湖西岸域の斐伊川を含む 5 河川と，3 排水樋門，宍道湖南岸の 9 河川と，3 小水路，及び北岸の 10 河川と，2 水路において，各 1 地点の計 32 地点において 1996 年から 2003 年にかけて，概ね年間 3 回のピッチで，一日 1 回の採水（雨天時を含む）と，同時に流量観測を実施した。

出水時調査

斐伊川においては極力広い流量範囲での観測を念頭に，1993 年から 2001 年にかけて，台風等の出水時に，合計 20 回の日複数回の調査を実施した。流量は，大津流量観測所 (St.No.1) の流量値を使用した。

水文観測

1996 年から 2001 年にかけて，平水時調査では各河川，水路において，事前に調査位置の横断測量を行い，調査当日には採水と同時に水位観測と電磁流速計（KENEK 社製 VM2001）による流速の観測を行った。斐伊川における採水時の流量については，月 1 回の定期水質観測時における大津流量観測所の流量値を（平水時流量として）使用した。

また，排水機場の排水量については各排水機場における排水ポンプの性能に基づき，新三分市排水樋門 $0.87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ，新右岸排水樋門 $0.58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ，荘原新田排水樋門 $0.24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とした。

水質分析

COD は過マンガン酸カリウム酸化法による分析を行った。TN はアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム，TP はペルオキシ二硫酸カリウムを加えオートクレ

ープ中、1.2 気圧 30 分で分解無機化後、上澄み液についてそれぞれ自動分析装置 (BRAN+LUEBBE 社, TRAACS-800) による分析を行った。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、試料をガラス繊維ろ紙 (Whatman GF/C、粒子保持能 $1.2\mu\text{m}$) でろ過した後、自動分析装置 (BRAN+LUEBBE 社, TRAACS-800) による分析を行った。なお $\text{NH}_4\text{-N}$ はインドフェノール青法、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 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、 $\text{NO}_2\text{-N}$ はナフチルエチレンジアミン法、 $\text{PO}_4\text{-P}$ はモリブデン青法による。無機態窒素については $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の和を全無機態窒素 (TIN) として求めた。

調査結果および考察

流入水の流量及び水質

(流量) 宍道湖への流入水量は、最大流域面積を持つ斐伊川 ($34.5\text{m}^3\text{ s}^{-1}$) が最も大きく、流入水の 78% と、全流入水の約 8 割を占めている。

(COD) 斐伊川の COD 値は最も低く、斐伊川以外、宍道湖における環境基準値 3.0 mg L^{-1} を下回る地点はなかった。他地点では、基準値の 1.1~3.4 倍の範囲にあったが、7 地点が基準値の 2 倍を超える濃度であった。

(TN) TN 濃度は山居川が平均値、最大値ともに最も高く、市街地からの負荷を示した。また、最大値は宍道湖西岸の排水機場地点 (Sts. 6, 7, 8) と北岸の岡本川 (St. 25) において高い傾向が見られた。斐伊川の平均 TN 濃度は 32 河川中低い順で 9 位であったが、斐伊川を含め 32 点全てが宍道湖における TN の環境基準値 0.4 mg L^{-1} を超えており、そのうちの 17 地点が基準値の 2 倍を超える濃度であった。

(TIN) 斐伊川を含め、32 地点中 22 地点が、宍道湖における基準値 0.4 mg L^{-1} を超える濃度であった。またそのうちの 10 地点は、基準値の 1.5 倍を超える濃度であるが、宍道湖西岸域の 7 地点はすべてが基準値を超え、かつ基準値の 1.6~3.9 倍の濃度であった。TIN 濃度も山居川が最も高いが、TIN のうち $\text{NH}_4^+\text{-N}$

濃度の占める割合が 61% ,また山居川同様 ,西岸域の三つの排水樋門(Sts. 6, 7, 8) における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度も高く , 3 地点平均で 63 %と , $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に比べ $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の占める割合が高いことが分かった。山居川のような市街地や , 宍道湖西岸域などの田畑や住宅地を背景とする河川において , $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の比率が高い傾向がうかがえた。

(TP) TP 濃度も TN 同様 , 山居川は平均値 , 最大値ともに最も高い値であった。また TP 濃度の最大値は COD 同様 , 宍道湖北岸 (St. 21 ~ 26) において高い傾向が見られた。斐伊川の TP 濃度は COD 同様 , 最も低い。しかしながら斐伊川以外全てが宍道湖における TP の環境基準値 0.03 mg L^{-1} を超えており , そのうちの 28 地点が基準値の 2 倍を超えていることが分かった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は , TP の環境基準値 0.03 mg L^{-1} を超える地点は 32 地点中 7 地点で , TIN に比べると基準値を超える地点数は少なかった。また TIN 濃度の高かった宍道湖西岸域地点においても , $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は宍道湖における TP の環境基準値の 0.23 ~ 0.65 倍と , TIN 濃度に比べるとその濃度は比較的低いことが分かった。

流入水水質の流域特性

宍道湖への流入河川 全 32 地点の水質 7 項目を対象に , 各平均値に対して , クラスタ分析を行ったところ , 流入水の水質は 5 つのクラスターに分類された。

COD 値や TN 濃度 , TP 濃度等で示される総合的な汚濁の程度の差が分類に反映された。最も汚濁の進んだ河川は南岸の 1 河川で , 次に続く汚濁度がかなり悪い水路が南北それぞれ一地点 , そして汚濁度が中程度の河川と汚濁度が相対的に低い河川は , 南北ほぼ同数であることが分かった。ただし西岸域においては , 特に TN 濃度や $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高い 1 つの河川と , 3 つの排水樋門がひとつのクラスターとして分類された。

斐伊川における出水時の水質特性

COD における懸濁態分(PCOD)の割合は ,平水時の 17%が出水時には 75 % に , 懸濁態窒素 (PN) は 9 %が 46 %に , また懸濁態リン (PP) は 50 %が 85 % へと , 出水時には懸濁態分がそれぞれ大きく増加するが , 出水時においてリン は , 懸濁態分の割合が窒素に比べ大きくなることが明らかになった。

平水時においては , 溶存性窒素 DTN の 63 %を占める $\text{NO}_3\text{-N}$ が TIN の 93 % を占めるが , $\text{NH}_4\text{-N}$ は 10 %未満と , その大半は $\text{NO}_3\text{-N}$ により占められることが分かった。また出水時においても $\text{NO}_3\text{-N}$ は TIN の 90 %を占め , TIN の組成はほとんど変わらないことが分かった。

$\text{PO}_4\text{-P}$ が全体の 9 %であるのに対し , TIN は全体の 62 %と , 出水時における TIN の負荷寄与率はリンに比べ極めて大きいことが分かった。

溶存態分の 67 %を占める $\text{NO}_3\text{-N}$ は他項目と異なる動態を示した。その濃度上昇は , 流量ピークより遅れて出てくる場合が多く , 6/29-30(1993)の出水時においては , $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度のピークは流量ピークの前にあるが , 一度下がった濃度が流量ピーク後に , 再び徐々に上昇していく状況が伺えた。流域における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の動態は , 流域の特性も絡み , 単純ではないと推察された。このことから , 流域における窒素循環に係る基礎調査として , 流域内降雨による負荷の見積もりも含め , ベース水としての降雨が持つ TIN 濃度の , さらに詳細な調査を行っていく必要がある。

流量と負荷量の関係

各河川 , 水路の流量と負荷量の関係

本研究においては , LQ 式として一般的な $L=aQ^b$ の形となる , ベキ乗回帰による方法を採用した。

斐伊川本川の流量と負荷量の関係

出水時データ群と平水時データ群の回帰式における b (傾き) の値に差があ

ることが分かり、全体データから得られる回帰式(⑤式)を使用して全流量域における負荷量を算出することは、精度上問題があることが明らかになった。

出水時と平水時のデータ群それぞれの傾きの接点が、窒素は $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 付近にあり、その他の項目は $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 付近にあることを見出した。そこで窒素の平水時データ群における $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以上のデータについては、出水時データと合わせて扱うこととし、その他の項目においては $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以上のデータについて、同様に出水時データと合わせて扱うこととした。LQ 式を算定するにあたり、まず窒素は $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以下のデータ群、その他の項目は $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以下のデータ群から LQ 式を求め(式)、その後、出水時データ群から得られる LQ 式が窒素は $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、その他の項目は $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の位置を通るように LQ 式を求めた(式)。

斐伊川における各種 LQ 式の評価

LQ 式 から得られる負荷量は LQ 式 と から得られる負荷量より大きく、COD で 2.6~0.7 倍、TN で 1.1~0.9 倍、TIN で 1.1~1.0 倍、TP で 1.9~0.8 倍、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で 1.3~1.0 倍と TN、TIN 以外の項目においては大きく差が出るのが分かった。

この結果から、特に COD、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ においては、全データから得られる LQ 式 を使用して全流量域における負荷量を算出することは、精度上問題があると判断された。

周辺からの流出負荷特性

平水時における宍道湖への流入負荷は、流入水量の 78% を占める斐伊川が、COD、TN、TIN、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ それぞれにおいて全体の 60%、40%、62%、31%、36% と、高い割合を占めることが分かった。

斐伊川以外の河川からの総流量は 22% と小さいにもかかわらず、その TN 及び TP の負荷割合はそれぞれ 60% 及び 69% を占めることも重要な負荷特性と

言え、周辺からの流入負荷対策を考える上で熟考すべき点と考えられた。

周辺からの流入負荷における N:P 比

宍道湖西岸域以外では流入負荷量の平均値における N:P 比は 10~62 で平均 24 であるが、斐伊川の平水時における N:P 比は 75 と窒素の比率がかなり高く、さらに斐伊川を除く西岸域地点は 41~325 (平均 161) と、斐伊川の 2 倍以上高く、宍道湖西岸域地点は $PO_4\text{-P}$ 濃度に比べ、 TIN 濃度が特異的に高いことが分かった。

TIN 負荷の寄与率が高い西岸域においては、湖底泥からの溶出(内部負荷)によって $PO_4\text{-P}$ 濃度の高まる夏~秋に湖内生産の高まりが想定された。

斐伊川の流出負荷における $TN:TP$ 比を見ると、平水時の 29 から出水時には 6.0 と大きく減少していることから、リン負荷は相対的に懸濁態として出水時に高まることが明らかになった。懸濁態として宍道湖に流入したリンは湖底に堆積し、窒素に比べより時間差をもって、二次的に湖水質に影響を与えている可能性が示唆された。

流入水間の流量相関

水位観測所が設置されている St.No.17 と同じく St.No.13 は比較的多くの河川と有意な相関を示し、有意水準 1%及び 5%で St.No.13 は 27 河川中 19 河川を、St.No.17 は 12 河川を推算出来ることが分かった。一方、宍道湖北岸においては水位観測所が未設置であるが、同じく有意水準 1%及び 5%で St.No.24 と St.No.29 の 2 河川で、宍道湖北岸 12 河川すべてを推算出来ることが分かった。

第 3 章．湖内現場観測による湖底堆積物からの無機栄養塩の回帰速度の評価

はじめに

考案した多層同時採水器を用い、多地点における、迅速な多層同時採水を実施し、宍道湖における内部負荷について明らかにした。本調査では、底泥直上高塩分層内における無機栄養塩の成層状況の連続観測から、底層水中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検討した。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検討した。

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 km² で、東西方向約 17km、南北方向約 6km、また最大水深は 6.0m である。水深 5 m の湖面の面積は 28.5 km² 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、湖中央部に滞留することにより、塩分底成層を形成する。

採水地点は、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 点ずつの計 5 観測点を設けた。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

注射筒を使った多層採水器(下部に 5 kg の錘を付けた支柱に 30 ml 容の注射筒を 20 cm 間隔で固定)を考案し、注射筒に湖水を吸引し、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 μ m）で過した後、ろ液について硝酸態窒素（NO₃-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、アンモニア態窒素（NH₄-N）、リン酸態リン（PO₄-P）を分析した。分析は自動分析装置（BRAN+LUEBBE 社、TRAACS-800）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。

無機栄養塩の回帰速度の算出法

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 1m 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 km² に水深 1 m を乗じ、対象とする水体の体積を 2.85 $\times 10^7$ m³ 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

現場観測による内部負荷の評価

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。回帰式の傾きより TIN の回帰速度は 1.4×10^3 kg day⁻¹、PO₄-P の回帰速度は 2.2×10^2 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 mgN m⁻² day⁻¹、PO₄-P は 7.7 mgP m⁻² day⁻¹ となった。したがって、その N:P 比は 6.4 と計算された。

回帰速度の N:P 比

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。

第4章 室内実験による湖底堆積物からの窒素、リン及びDOCの回帰速度の評価

はじめに

宍道湖における湖底泥からの溶出において、直上水の溶存酸素状態が好氣的である場合と、嫌氣的である場合の、二つの状態における回帰量の違いを明確にすること、また、無機態総窒素 (TIN: $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、溶存性有機態窒素(DON)、溶存性有機態リン(DOP)及び溶存性有機態炭素(DOC)の回帰速度と湖底環境との関係を明らかにすることを目的とし、アクリル管を使って底泥コアを直上水ごと採取し、好気、嫌気の基本的2条件での室内溶出実験を行い、回帰量について比較検討した。

宍道湖の概況および採泥地点

本研究における調査地点は、全淡水流入量の約8割を供給する斐伊川からの負荷を直下に受ける宍道湖西部(S6)と密度底成層の影響を受けやすい湖心部(S3)の2カ所において底泥コアを採取し、湖底堆積物からの栄養塩等の回帰速度とそれぞれの特性を究明するために室内実験を行った。

底泥コアの採取方法

潜水夫による底泥コアの採取を行ったが、溶出実験用として、内径10cm長さ120cmのアクリル管による底泥コア(アクリル管中に直上水も含む)と、粒度組成分析用として内径10cm長さ60cmのアクリル管による底泥コア、同じく底質分析用として内径5cm長さ50cmのアクリル管による底泥コアを採

取した。溶出実験用カラムの採取底泥厚は 15cm 程度とした。

溶出実験

溶出実験は遮光した恒温器中において、20℃における嫌気条件、好気条件の 2 ケースとしたが、好気条件には空気曝気、嫌気条件には窒素曝気を底泥上 30cm 程度の位置で継続的に行った。

水質分析

試料はガラス繊維ろ紙（Whatman GF/C、平均孔径 1.2 μ m）でろ過した後、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P について、また DTN はアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム、DTP はペルオキシ二硫酸カリウムを加えオートクレーブ中、1.2 気圧 30 分で分解無機化後、上澄み液についてそれぞれ自動分析装置（BRAN+LUEBBE 社、TRAACS-800）により分析を行った。DOC は燃焼酸化-赤外線自動分析法によるが、全有機態炭素計（島津 TOC-V CSN）により分析を行った。DO はウインクラーアジ化ナトリウム変法により求めた。

底質分析

底質試料は、含水比、強熱減量（Ignition Loss:IL）、全窒素（TN）、全リン（TP）、酸揮発性硫化物（AVS）について分析した。粒度組成はふるい法により測定した。

結果および考察

各水域における底質の特性

斐伊川の影響を強く受ける宍道湖西部（S6）では、砂の比率が S3 地点（0.1 ~ 2.1 %）に比べ大き（9.9 %）かったが、TP（1.1 mgP g-dry⁻¹）は宍道湖湖心 S3（0.67 mgP g-dry⁻¹）の倍近く高い値であった。また、TS(AVS)は、S6 で 1.8 mgS g-dry⁻¹、S3 で 2.3 mgS g-dry⁻¹ と比較的高く、宍道湖程度の塩分（S6: 5.7psu; S3:

7.2psu) が存在すれば、硫酸還元は十分に起こることを示した。

水質パラメータの時系列変化

1) 好気条件

S3 の好気条件では、窒素については、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が増加した。また、好気条件下においても $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出することを示した。

S6 の好気条件では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の上昇は無く、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が一次関数的に上昇した。S6 付近では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は、硝化細菌によって底泥表層の酸化層において速やかに硝化されることを示唆している。

また S3 同様に、好気条件下においても $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が認められた。

2) 嫌気条件

S3 においては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が一次関数的に増加し、その増加量は好気条件下より大きかった。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は好気条件下とは異なり、一次関数的に増加した。

S6 においては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、S3 同様一次関数的に増加した。一方 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、好気条件下における濃度上昇と一変し、急激な濃度上昇を示した。

各水質パラメータの回帰速度

1) 好気条件

S3 においては、 TIN 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では、それぞれ $12\sim 18 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、 $0.8\sim 5 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ が得られた。 DON 、 DOP はそれぞれ $3.3\sim 4.2 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、 $-0.9\sim 0.3 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ が得られ、 DOP での溶出はほとんど無いことを示した。

DOC は $22\sim 31 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ が得られた。

S6 においては、 TIN は、 $12 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。一方 $\text{PO}_4\text{-P}$ の回帰速度は $4 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ が得られた。 DON は $3.9 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であり、 DOP は 0.3 mgP

$\text{m}^{-2} \text{day}^{-1}$ であった。

DOC は $31 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ であった。

2)嫌気条件

S3 においては, TIN は, 好気条件における回帰速度より大きい値 $26 \text{ mgN m}^{-2} \text{day}^{-1}$ が得られた。PO₄-P は好気条件における最大回帰速度の 5 倍の値 $20 \text{ mgP m}^{-2} \text{day}^{-1}$ を示した。DON は好気条件よりやや低い $2.0 \text{ mgN m}^{-2} \text{day}^{-1}$ であったが, DOP は好気条件より高い $2 \text{ mgP m}^{-2} \text{day}^{-1}$ となった。

DOC は, 一転して好気条件より大きく, 好気条件最大値の 2 倍の $62 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ となり窒素・リン同様に, 嫌気条件下において回帰速度が大きくなった。

S6 においては, TIN は S3 における値より大きく, かつ S6 好気条件の約 3 倍の $38 \text{ mgN m}^{-2} \text{day}^{-1}$ が得られた。PO₄-P は, 好気条件における回帰速度の 15 倍, S3 の嫌気条件における回帰速度の 3 倍の $60 \text{ mgP m}^{-2} \text{day}^{-1}$ が得られた。

このことは, 底泥中の有機物から分解生成した PO₄-P は, 底泥表層の酸化層で鉄の酸化物に吸着され, 嫌気条件に移行すると容易に遊離する形態で蓄積していることを示唆している。

DON が S3 の 2 倍 ($4.0 \text{ mgN m}^{-2} \text{day}^{-1}$), DOP は S3 の 5 倍の高い値 ($10 \text{ mgP m}^{-2} \text{day}^{-1}$) であった。

DOC は S3 同様, 一転して好気条件より大きく, 好気条件の約 4 倍 ($120 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$) であった。有機物の指標である DOC の回帰速度が S6 において特に大きい数値となったことは, 斐伊川からの負荷を直下にうける水域の底質的特徴を示すものと考えられる。

両地点の特性と回帰速度の関係

好気条件下の S3 においては, NH₄-N として溶出した後, 硝化反応が進み NO₃-N に変化する。

好気条件下の S6 においては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ としてではなく $\text{NO}_3\text{-N}$ として溶出することが分った。S6 は、湖心部と違って比較的好気的環境に曝されやすいことから、硝化細菌が活性化しやすいことを反映するものと考えられる。嫌気条件下では、いずれも $\text{NH}_4\text{-N}$ として溶出し、ほぼ一次関数的に上昇した。

好気条件下においても有意に $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が認められた。好気条件下におけるリンの溶出については、表層堆積物中の有機物の無機化に伴うリンの溶出によるものと推察される。また嫌気条件下では、いずれもほぼ一次関数的に上昇を示した。

DOC は、好気条件に比べ嫌気条件において回帰速度が 2.2~3.9 倍大きくなり、嫌気下において溶出が進むことが明らかになった。

底質の特性として、S6 では砂の比率が S3 地点に比べ大きいことが分ったが、TP 濃度は S3 の倍近く高い値であった。

これは、斐伊川から洪水時に排出負荷される粒状物質の影響を強く受けていることを示唆し、S6 における DOC、特にリンの回帰速度が S3 に比べて高いことを支持する

湖底堆積物からの無機態の窒素・リン及び溶存有機物の回帰速度は、両地点の湖底特性を反映することが明らかになった。

斐伊川からの排出負荷の影響を強く受ける S6 における溶出量は特に大きいことが明らかになり、今後、内部負荷対策として取り組むべき重要課題と位置づけられた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，始終御懇篤なるご指導，御校閲を賜った島根大学総合理工学研究科清家 泰教授に深甚なる感謝の意を表します。またご支援を賜った，国土交通省中国地方整備局溝山 勇様，伊藤 健様，西尾正博様ならびに，資料の提供を賜った国土交通省出雲河川事務所の関係各位には心より感謝申し上げます。また本研究を遂行するにあたり，暖かいご協力を賜った島根大学総合理工学研究科管原庄吾助教に心より感謝申し上げます。さらに，社団法人中国建設弘済会出雲支部試験室（現、株式会社 CM エンジニアリング）の歴代の皆様方には，本研究を支えていただきましたこと，心より感謝申し上げます。同じくご支援を賜った，同広島支部試験室（同）金岡裕子氏に，心より感謝申し上げます。