

斐伊川における流入負荷の実態把握

1-1. 斐伊川汚濁負荷量調査

(注：赤字部分は暫定値 流量等のデータがそろい次第修正します)

(1) 目的

宍道湖の流入水量の 7 割を占める斐伊川からの流入負荷を正確に把握するため、過去 3 回 (1983-1984 年、2001-2002 年、2010-2011 年)、1 年間にわたる負荷量調査を行ってきた。また、2010-2011 年の調査以降、斐伊川では尾原ダムや斐伊川放水路が供用開始されるなど、河川の状況も変化している。

過去の調査から、全リン (TP) は流量増加に伴い濃度も上昇するが、特に高流量時は全リン負荷量が L-Q 式の 1 次の近似曲線から高濃度側にシフトしていく傾向がみられた。そのため、全リン濃度の高い高出水時のデータを充実させ、高流量部分の L-Q 式の精度を上げ、流入負荷をより正確に把握することを目的とし、出水時の高頻度採水調査を行った。

(2) 方法

斐伊川 (神立橋) の水質調査を 2022 年 6 月～2023 年 5 月までの 1 年間、週一回の頻度で実施した。また、リン負荷の多くを占めると考えられる大雨等による高流量時は、流量増加初期から流量減少期まで 1 時間に 1 回など、高頻度で水質調査を行った。

また、過去の調査で高流量時は斐伊川流域の懸濁態リン濃度が高くなり、懸濁態リンの中でも自然環境下で溶出しやすい Fe 型リンの割合が高いことが分かっている。高流量時の高頻度調査において形態別無機態リンの分析を行い、Fe 型リンの負荷量を推定した。

流量については、国土交通省出雲河川事務所から同調査期間の上島観測所の水位と H-Q 式 (暫定値) の提供をうけて算出し、水質調査結果と合わせ、斐伊川から宍道湖への流入負荷量を算出した。

(3) 結果及び考察

【流量】

2022 年の調査期間中の日平均流量は 9.4 m³/sec～358.60 m³/sec、平均流量は 40.4 m³/sec であり、年流量は 12.7 億 m³/year であった。

【全リン負荷量】

2022 年の週 1 回の平水時調査と高流量時高頻度調査による高流量時のデータも含めた L-Q 式を作成し、年間負荷量を算出した。L-Q 式に用いた流量は、斐伊川放水路の分流点の上流に位置する上島水位観測所の水位から算出した。ただし、洪水時等で斐伊川放水路への分流が行われた場合は、分流された流量に応じた負荷量を差し引いて計算する必要がある。

2022 年の高流量時高頻度調査により、平水時だけでなく、高流量時のデータが多く取れたため、高流量時においてもデータ分布は L-Q 式の 1 次の近似直線に近いものとなり、よ

り精度の高い L-Q 式が作成されたと考える。

日平均水量と作成した L-Q 式から算出した斐伊川から宍道湖への全リンの年間負荷量は **59.0t** であった。

斐伊川では、洪水時に河川水の一部を斐伊川から神戸川に分流する斐伊川放水路が平成 25 年 6 月に供用開始されている。2022-2023 年の調査期間中に斐伊川放水路による河川水の神戸川への分流が 1 回行われている (2022.7.19)。この分流が行われなかったと仮定した場合、**2022 年**の全リンの年間負荷量は **60.5t** と試算された。このため、この分流により、宍道湖に流入する全リンが 1.5t 削減されたと考えられる。

また、平水時調査における、流量で重みづけを行った全リンの加重平均濃度は **0.060mg/L** (単純平均値は **0.03mg/L**) であった。

【全窒素負荷量】

全リンと同様に全窒素について作成した L-Q 式から算出した全窒素の年間負荷量は〇〇〇t であった。斐伊川放水路の分流により削減された年間負荷量は〇〇t と試算された。

また、平水時調査における加重平均濃度は〇〇mg/L(単純平均値は〇〇mg/L)であった。

【過去調査との比較】

表 1 にこれまで行った負荷量調査の概要を、図 1 に全リン、全窒素の L-Q 式を示す。4 回目となった **2022 年**調査では年流量が **12.7 億 t** であり、全リンの年間負荷量は **59t** であった。負荷量は流量と濃度の積で求められるため、総流量の最も少ない 4 回目の調査の負荷量が最も少ない結果となった。い

調査期間ごとの負荷量は河川流量に大きく影響を受けることから、各調査期間における負荷量と流量の分布図、及び L-Q 式の比較を行った。1983-1984 年、2001-2002 年、2010-2011 年の 3 回の調査に比べ、**2022 年**の調査では一時式の傾き (青色の実線) が大きくなっている。これは、過去 3 回の調査では高流量時のデータ数が比較的少なく、平水時のデータ数が多いが、**2022 年**の調査では高流量時高頻度調査により高流量時のデータ数が比較的多くなり、より多いデータ数の部分に一次直線が反映されたためだと考えられる。

全窒素については 3 回目の調査までは年間負荷量は増加していたが、**2022 年調査**では年間負荷量が **652t** となり、以前の 3 回の調査に比べ最も少ない結果となった。加重平均濃度についても、3 回目の調査までは増加していたが、**2022 年**の調査では **0.58mg/L** であった。3 回目の調査では、冬季の硝酸態窒素濃度の顕著な上昇が見られたが、4 回目の調査では冬季の硝酸態窒素濃度が 3 回目調査から低下していた (図 2)。これは、降雨による流域外からの越境負荷が低下したと推察される。

表 1 過去の斐伊川高頻度調査の概要

(表 1、図 1 とともに 2022 年調査は 2022-2023 として数値の変更あり)

調査時期	1983-1984	2001-2002	2010-2011	2022
総流量 (億 m ³)	14.1	14.3	16.1	12.7
全リン負荷量 (t/年)	95.6	62.4	92.1	59.0
全窒素負荷量 (t/年)	857	922	1,065	652
全リン加重平均濃度 (mg/L)	0.068	0.044	0.057	0.060
全窒素加重平均濃度 (mg/L)	0.61	0.64	0.66	0.58

調査時期	1983-1984	2001-2002	2010-2011	2022-2023
全窒素負荷量 (t/年)	857	922	1,065	
全窒素平均濃度 (12月～3月)	0.51	0.60	0.76	0.60
硝酸態窒素平均濃度 (12月～3月)	0.41	0.44	0.67	0.52

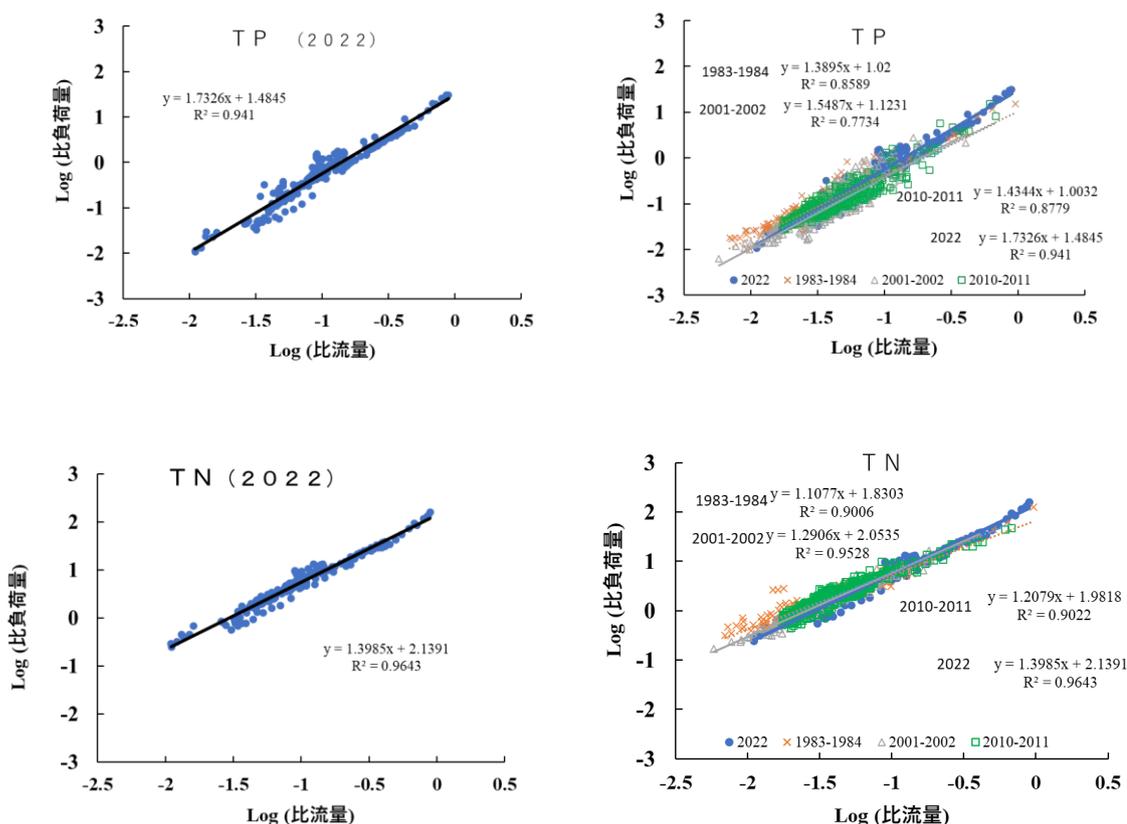


図1 全リン、全窒素の流量－負荷量散布図

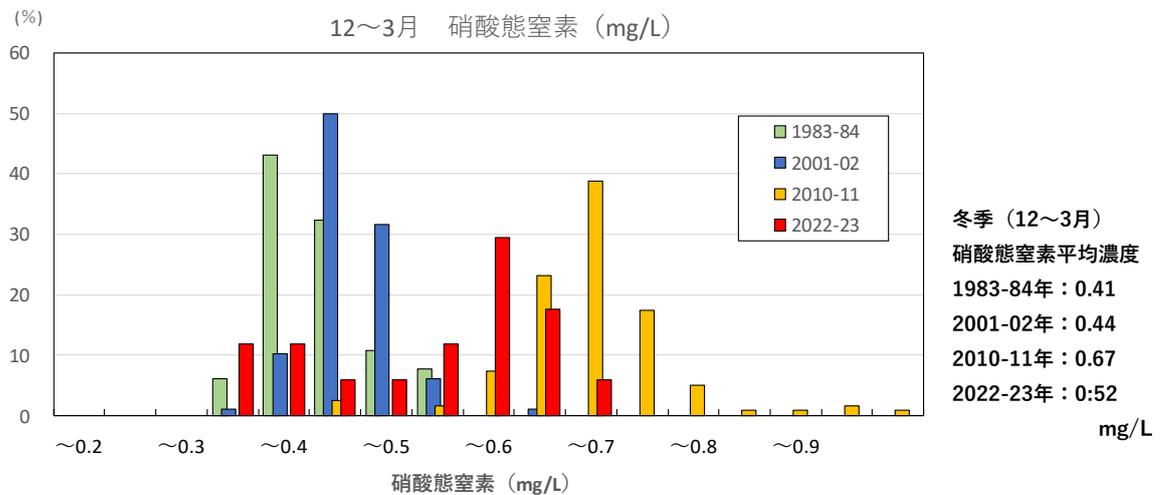


図2 冬季（12～3月）における硝酸態窒素濃度分布

【Fe型リン負荷量】

2022年に4回行った高流量時高頻度調査による懸濁態リン中のFe型リン濃度と流量からL-Q式を作成し、年間負荷量を算出した。神戸川へ分流された負荷を差し引いた2022年のFe型リンの年間負荷量は5.7tであり、Ca型リンやAl型リンなどのその他の形態別無機態リンの年間負荷量は10.9tであった。

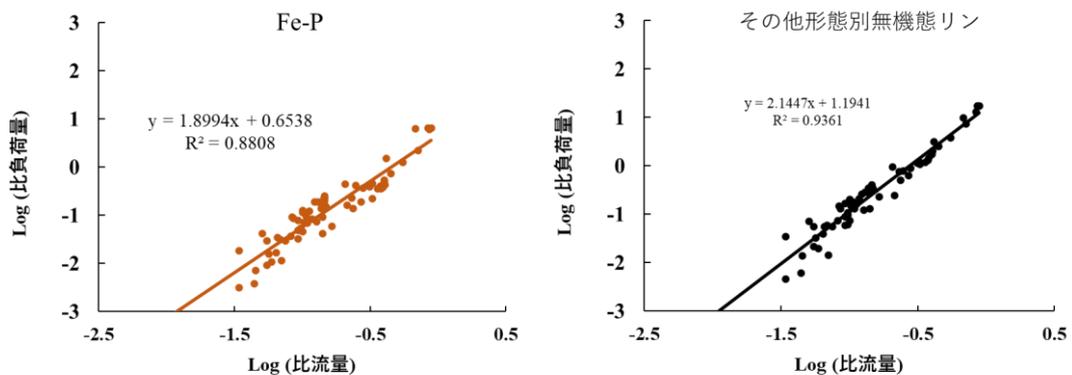


図3 形態別無機態リンの流量-負荷量散布図

1-2. 高流量時高頻度調査

(1) 目的

過去の調査で出水時に発生する濁水が原因で斐伊川流域の懸濁態リン濃度が高くなり、懸濁態リンの中でもFe型リンの割合が高いことが分かっている。また、宍道湖に流入したFe型リンは、嫌気的環境下における鉄の還元時、および硫化水素とFe型リンとの反応した際にリン酸が溶出されることが知られている。しかしながら、負荷の高い出水時のFe

型リンの流出特性や湖水へのリンの回帰量は把握できていない。そのため、降雨等による出水時に高頻度で調査し、高流量時の流出特性を把握するとともに、宍道湖に流入した懸濁物を回収し、室内実験により湖水への回帰量を見積もることを目的とする。

(2) 方法

降雨等による出水時に、1時間に1回など高頻度で斐伊川（神立橋）の採水を行い、全リン、懸濁態リンの形態別調査等の水質調査を実施した。また、宍道湖内にセジメントトラップを設置し、湖内に流入して沈降する懸濁物を回収し、室内実験により懸濁物からの溶出特性を把握し、懸濁態リンの形態別調査と合わせて流入したリンの湖水への回帰量を算出した。セジメントトラップは、降雨等の出水が見込まれる前に、斐伊川河口から4.5km地点（地点B）と河口から8km地点（地点C：湖心）の2か所に設置し、出水後に回収した。

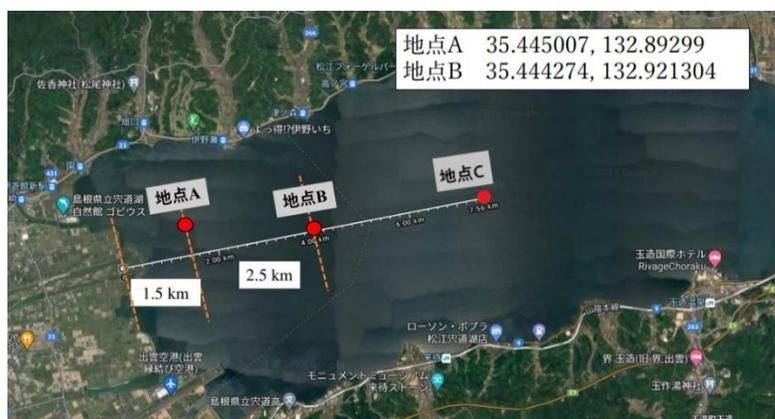


図4 セジメントトラップ位置図

(3) 結果及び考察

【全リンの濃度推移】

2022年の調査期間中に4回の出水時調査を行った。図5に調査日時、全リン濃度及び流量を示した。

1回目の調査では流量増加に伴って懸濁態リン濃度が高くなっているが、流量ピーク後は懸濁態リン濃度が急激に低下している。これは1回目の調査では比較的流量が大きかったため、河床堆積物を含む懸濁粒子が流量増加からピークにかけて河口へ流されたものと推測される。なお、この出水時には斐伊川放水路への分流が行われている。

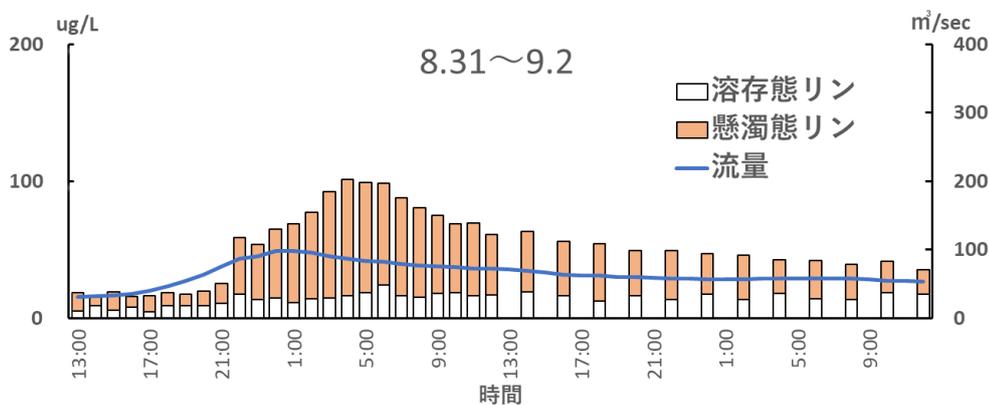
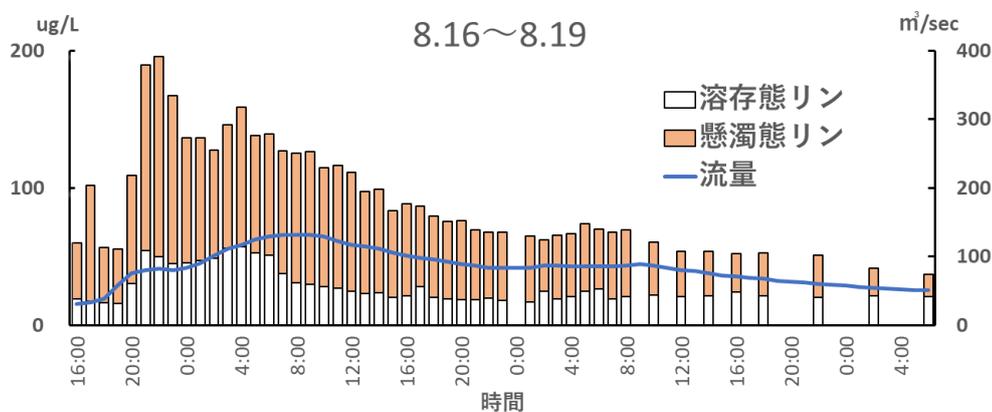
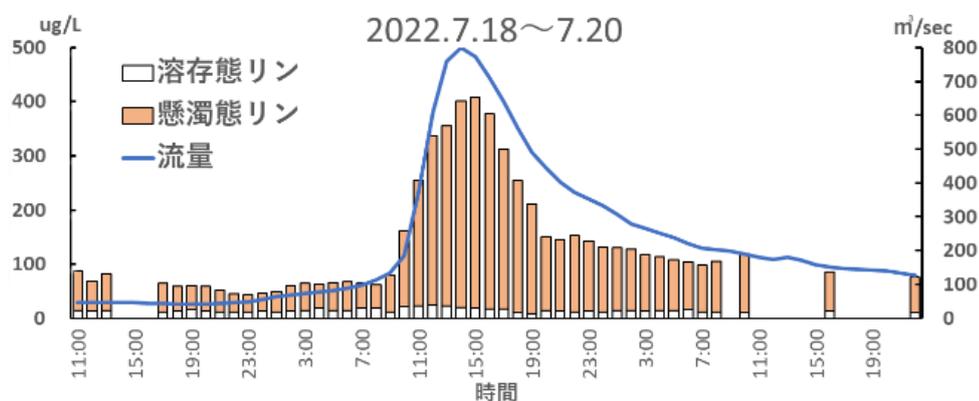
2回目の調査では流量増加時の一つ目のピークで全リン濃度が最大となっており、二つ目の流量ピークで全リン濃度もまた高くなっている。この調査ではほかの3回の調査に比べ、溶存態リンの濃度が高くなっているが、その原因は不明である。

3回目の調査では流量のピークに遅れて懸濁態リン濃度のピークが現れている。この調査では最大流量が100t/sec未満と少なく、上島水位観測所と採水地点の距離に起因する時間のずれが大きくなったことや、最大流量や流量変動が少ないために、リンを含む

懸濁粒子が流量増加期から流量ピークまでに一気に大量に流下するのではなく、ピークを過ぎても緩やかに流されたためと思われる。

4回目の調査では1回目の調査と同様に流量増加に伴って懸濁態リン濃度が高くなり、流量ピーク後、流量減少に伴って懸濁態リン濃度も低下した。

いずれの調査においても、流量が増加するにしたがって全リン濃度、中でも懸濁態リン濃度が高くなり、最初の流量ピークで最大濃度となり、流量ピーク後、流量の減少とともに懸濁態リン濃度も低下する傾向がみられた。



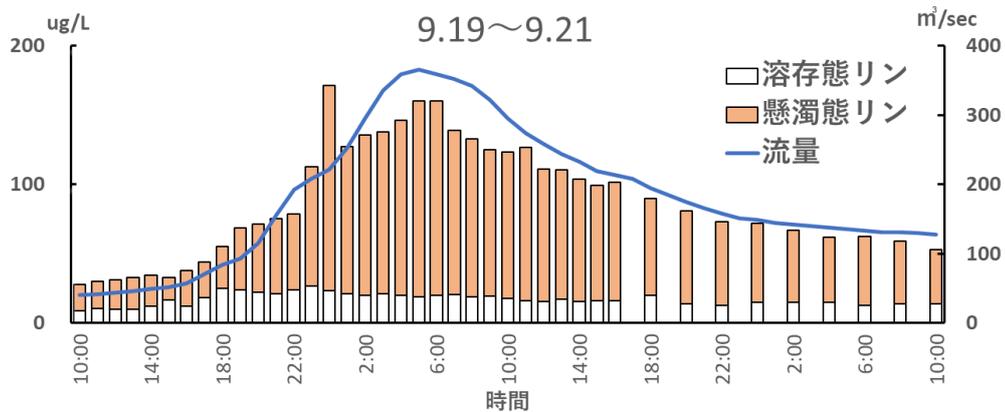


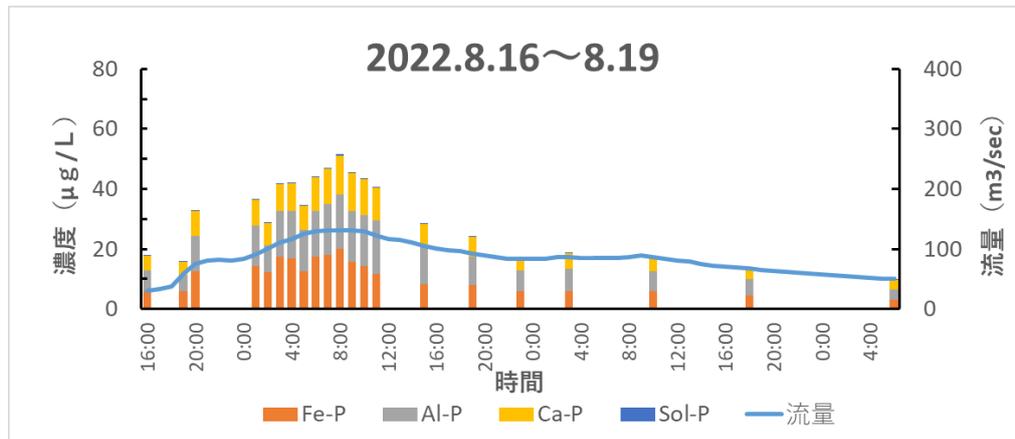
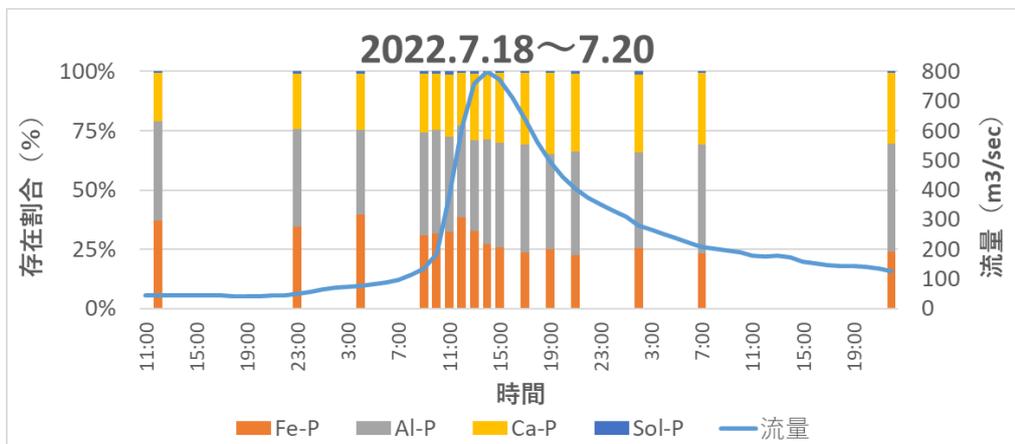
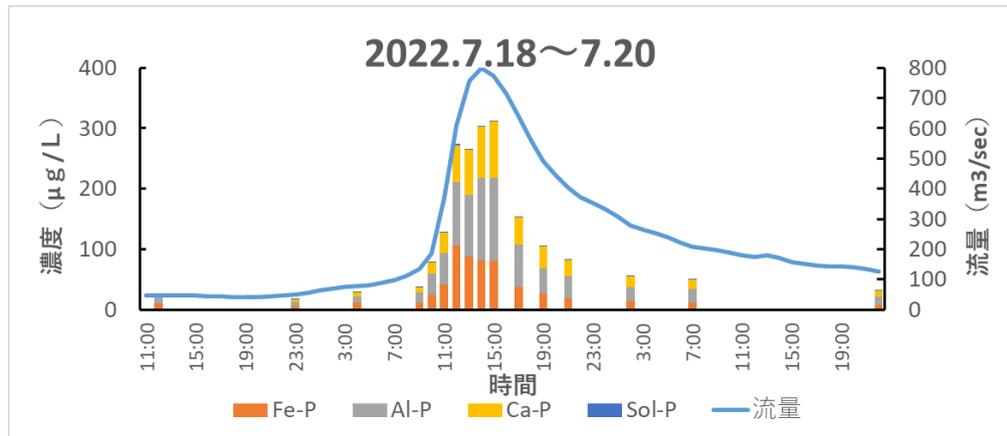
図5 高流量時連続調査時の流量とリン濃度

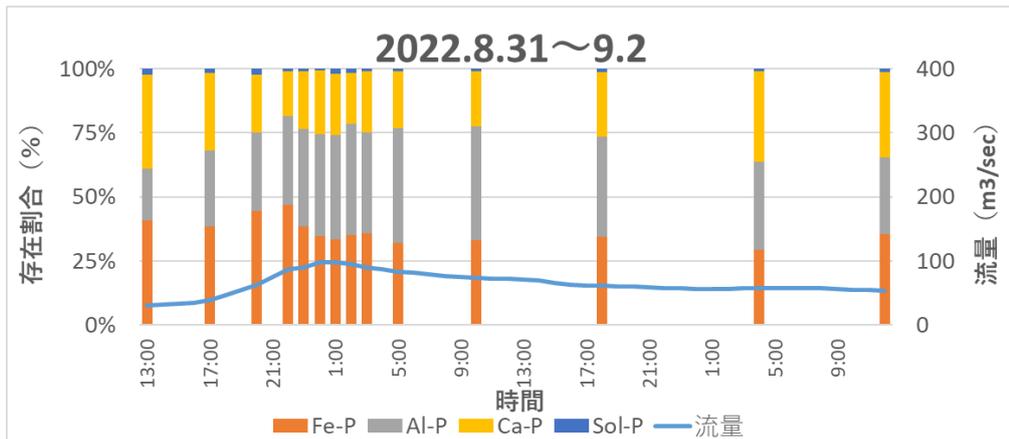
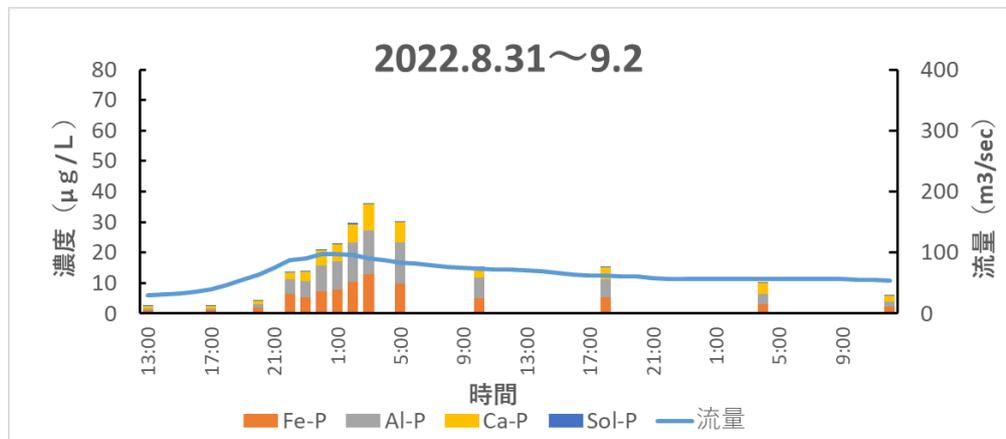
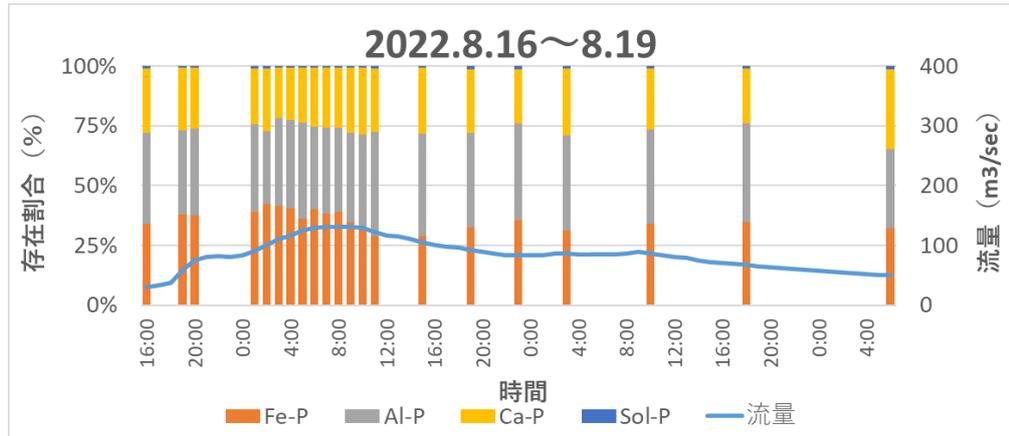
【Fe 型リンの濃度、割合推移】

2022 年の 4 回の出水時調査時の Fe 型リンを含む各無機態リン濃度及び割合の推移を図 5 に示す。懸濁態リンの濃度推移と同様に、いずれの調査においても流量が増加するにしたがって全無機態リン濃度も高くなり、流量ピークを過ぎ、流量減少とともに全無機態リンの濃度も低下する傾向がみられた。

流量が最も大きかった 1 回目の調査では、流量増加期は流量の増加にしたがい Fe 型リン濃度も高くなるが、流量ピークから流量減少期では Fe 型リン濃度が徐々に減少した。一方、流量の最も小さかった 3 回目の調査では流量のピーク以降も Fe 型リン濃度がしばらく高いままであった。これは全リンの濃度推移で述べたように、上島水位観測所と採水地点との距離に起因するものや、流量の変動が小さく、最大流量も低かったため、Fe 型リンを多く含む懸濁粒子は流量ピークまでに一気に大量に流下するのではなく、ピークを過ぎても緩やかに流されるが、その後、流量の低下とともに沈降したと思われる。2 回目と 4 回目の調査では、流量の増加とともに Fe 型リン濃度も高くなり、流量ピークで最大となり、流量の低下とともに Fe 型リン濃度も低下していた。

各無機態リンのうち、Fe 型リンの割合は、流量増加期が高く、流量ピークから流量減少期が比較的低下する傾向がみられ、高流量を伴う出水時は特にその傾向が顕著にみられた。前述の濃度推移と合わせ、Fe 型リンは増水前半期に宍道湖への流出が大きくなることが推察された。





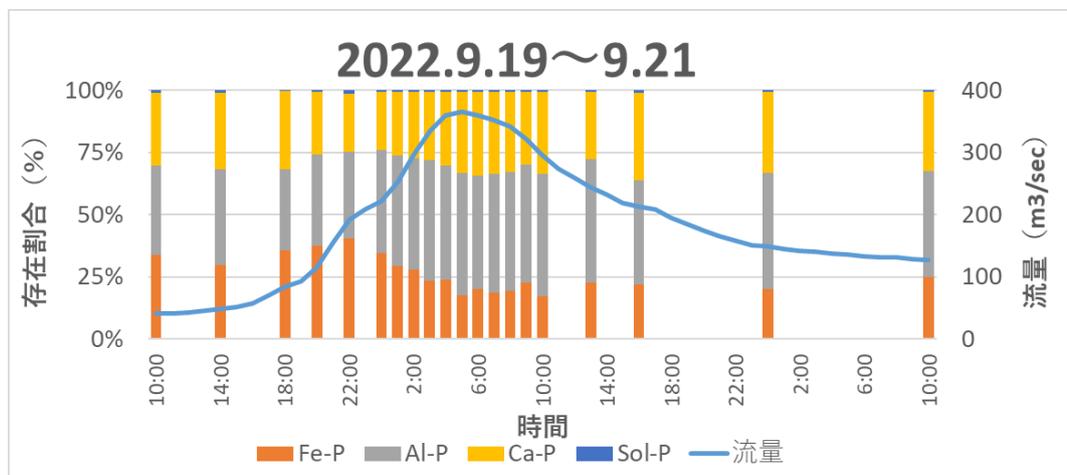
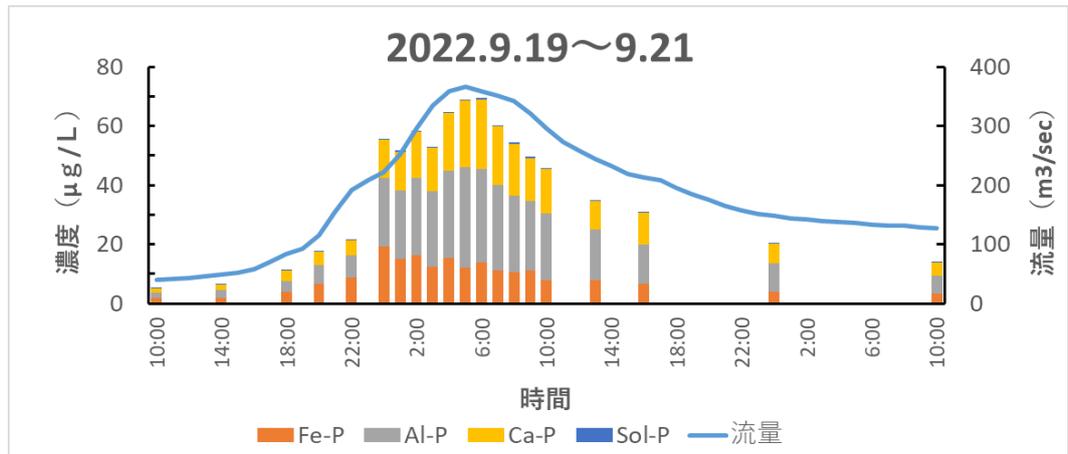


図6 各無機態リン濃度と存在割合

【リンの湖内への回帰量】

2022年9月4日から9月26日にかけて湖心に設置したセジメントトラップで回収した懸濁物質を用いて、硫化水素濃度が0 (=窒素置換水)、1, 10, 50, 100, 150, 600 mgS/Lの溶液に曝し、リン溶出をみる室内実験を行った。その結果、セジメントトラップで回収した懸濁物質では、硫化水素濃度の上昇に伴ってリンの濃度が増加し、硫化水素濃度が600 mgS/Lでは1200 μgP/g-dryのリンを検出した(図7)。また、硫化水素濃度が0 mgS/Lの条件においては233 μgP/g-dryのリンを検出した。この室内実験結果を用いて、水深5.25m以深部の堆積物から湖水に回帰したリンの量を推定した。なお、セジメントトラップでは、斐伊川から流入した懸濁物のみならず、湖内で再懸濁したものも捕捉した可能性が考えられるが、試算では回収量すべてが出水により湖内に流入したものとした。

また、水深5.25m以深部の面積は、国土地理院の面積計測ツールを使用して求めた。なお、推定に使用する硫化水素濃度は、2022年9月26日の底泥コアサンプリングの観測結果(堆積物表層0~1cm層)を勘案し、10 mgS/Lとした。

- ・セジメントトラップの面積： $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 3.14 = 7.85 \times 10^{-9} \text{ km}^2$
- ・セジメントトラップ回収量：2.84g（湖心）
- ・宍道湖の水深 5.25m 以深の面積：11.7 km^2
- 水深 5.25m 以深に堆積した堆積物の推定量
 $7.85 \times 10^{-9} (\text{km}^2) : 2.84 (\text{g}) = 11.7 (\text{km}^2) : a (\text{g})$
 $a = 4,230,000,000 (\text{g})$
- ・無酸素条件下で溶出したリン：233 $\mu\text{gP/g-day}$ （湖心セジメントトラップ堆積物による室内実験より）
- 4,230,000,000 (g)の堆積物から溶出したリン= $4,230,000,000 (\text{g}) \times 233 (\mu\text{gP/g-day})$
 $= 0.986 \text{ tP}$
- ・硫化水素 10mgS/L 条件下で溶出したリン：279 $\mu\text{gP/g-dry}$
- 4,230,000,000 (g)の堆積物から溶出したリン= $4,230,000,000 (\text{g}) \times 279 (\mu\text{gP/g-day})$
 $= 1.18 \text{ tP}$
- ・硫化水素 10mgS/L によって溶出したリン重量
- $1.18 \text{ tP} - 0.986 \text{ tP} = 0.194 \text{ tP}$

9月19日の出水時に湖内に流入した懸濁物を用いて室内実験を行った結果、湖内に回帰したリンの量は無酸素条件下では約1tのリンが湖水に回帰し、そこに10mgS/Lの硫化水素が存在すると0.2tのリンが回帰したことが分かった。

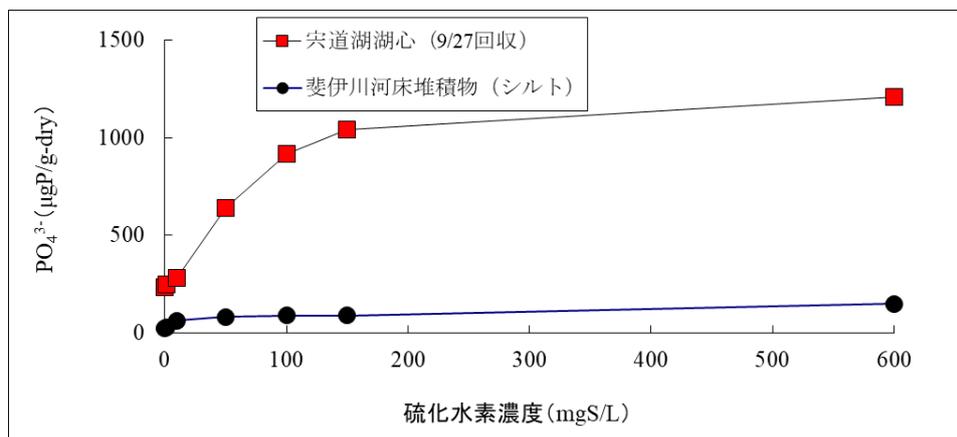


図7 硫化水素濃度別リンの溶出量

1-3. 濁水の負荷発生源の把握

(1) 目的

過去に行った調査により、出水時にリン負荷が上昇することがわかっている。斐伊川

出水時斐伊川出水時の負荷発生源の把握のため、斐伊川本川や支川、山林地域や水田地域で調査を行った。

(2) 方法

ケタ 水田の代掻きや田植え時期も含めた期間において、赤川流域の山林地域、水田地域で採水を行い、各地域での負荷量－流量散布図を作成した。(図7)

また、土壌成分の違いによって河床堆積物中のリンや金属などの組成が違うかを確認するため、蛍光 X 線分析装置を用いて分析を行い、斐伊川流域の河川ごとの土壌調査を試みた。

(3) 結果及び考察

出水時に斐伊川本川や各支川で調査を行った結果、赤川で全リン濃度が高いことがわかった。しかし、赤川の各地域での全リンの散布図を比較したところ、高負荷が予想された水田地域や山林地域はどちらも高負荷ではなく、山林地域は比較的負荷が低かった。流域の調査地点以外の地域、または水田地域や山林地域以外に高負荷の要因があると推測される。

各河川の河床堆積物の蛍光 X 線分析を行ったが、河床堆積物の同一試料における蛍光 X 線分析装置の測定値や、同一地点における分析結果のばらつきが大きく、地点ごとの比較ができなかった。

これまでの調査では、斐伊川出水時のリン負荷発生源を把握するには至っていない。

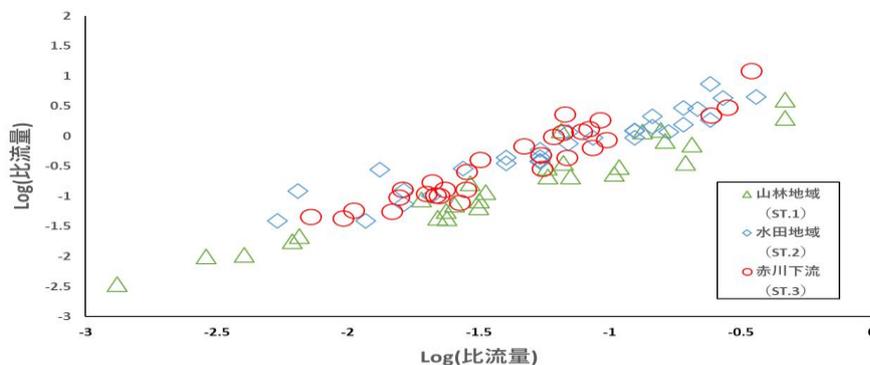
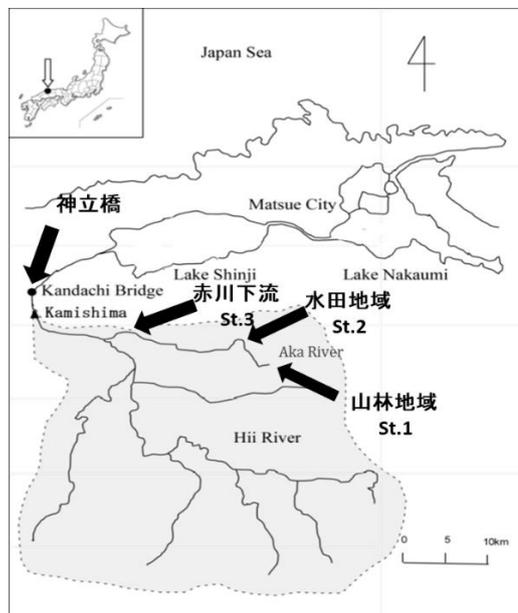


図7 赤川流域における全リン－負荷量散布図