

【報文】河川の汚濁負荷量解析モデルの改良に向けた 荒砥川調査について

前原克憲 梅澤真一* 田子博 宇野悠介 八木千聖 吉野有希菜

Survey of the Aratogawa River for improvement of the river pollution load analysis model

Katsunori MAEHARA, Shinichi UMEZAWA*, Hiroshi TAGO, Yusuke UNO,
Chisato YAGI, Yukina YOSHINO

公共用水域の効果的な水質改善対策のためには精度の高い汚濁負荷量解析が必要である。本県が、負荷量をより詳細に把握するため、県内全域を1 km²に区切った3次標準地域メッシュに各種汚濁負荷発生源データを配分し、流域別の汚濁負荷量と水質の推計を行ったところ、一部流域で推計値と実測値の乖離が確認された。本調査では、解析モデルの推計精度向上のため、乖離が確認された流域のうち最も乖離が大きかった荒砥川流域の詳細調査を行い、推計モデルの改良を試みた。その詳細調査の結果、流域の汚濁要因は人為的汚染源であると判明し、乖離原因は、解析モデルで採用した畜産系汚濁負荷量が過小であると考えられ、畜産系排出負荷量に対する流達率が低い、または流域の低水流量が過大であると推定された。

Key words : 公共用水域 public water、生物化学的酸素要求量 biochemical oxygen demand、汚濁負荷量 pollution load、負荷量解析 load analysis

1.はじめに

利根川の最上流に位置し、水源県である群馬県は水質保全に努め良好な水を下流都県に繋ぐ役割を担っている。しかし、生物化学的酸素要求量(BOD)値の環境基準達成率は全国平均を下回る状況が続いており、2020年度は全国平均の93.5%に対し82.5%となっている。水質が改善されている流域がある一方、改善が進まない流域は、長期にわたり環境基準未達成であるため、更なる対策が必要となっている。

本県では、効率的な対策を講じるため汚濁負荷量を把握し、現状および将来の水質の推計を行っている。梅澤ら(2022)は、汚濁負荷量をより詳細に把握するため、県内全域を3次標準地域メッシュ(1 km²)区画に区切り、発生源ごとの負荷量データを配分し、流域ごとに集計する

方法を用いている。人口や土地利用状況等のデータは1 km²メッシュごとのデータが公表されており推計に利用できるため、より実情に近い形で反映することができ、精度の高い解析が可能になると考えられる。この方法で2018年度データにより集計した現況汚濁負荷量から環境基準点におけるBODを算出し、実測値と比較した。その結果、一部の流域で、算出した推計値と実測値で乖離が確認された。そこで、梅澤らが行った汚濁負荷量の推計値の乖離が最も大きかった荒砥川流域について詳細調査を行い、推計モデルの改良を試みた。

2.調査方法

2.1.調査地点および期間

荒砥川(水質類型A)は、赤城山麓の赤城温泉から発し、前橋市内を南流する。流域面積は65 km²で南北に細長い流域となっている。流域上流から中流は、畜産業が盛んな地域である。上流

* 環境保全課

は田畑に囲まれ、中流となる大胡大橋付近は住宅が密集し、下流は市街地部に入る奥原橋（環境基準点）から土地利用が緻密になり、人口が増える。

調査は、2021年6月から2022年5月まで月1回（全12回）、環境基準点である奥原橋を含む10地点で橋の上から紐付きバケツで流心にて採水を行った（図1）。なお、採水地点は可能な限り等間隔（1.5～4km）となるよう設定した。



図1 荒砥川と採水地点（出典：前橋のかんきょう）

2.2.分析方法

分析項目および分析方法を表1に示す。気温、水温、透視度は現地測定し、その他の項目はポリプロピレン製ボトルに採水後、保冷状態で実験室に持ち帰り、測定した。

表1 分析項目および分析方法

分析項目	分析法
気温	JIS K0102 7.1
水温	JIS K0102 7.2
BOD	JIS K0102 21
SS	JIS K0102 14.1
全窒素 (TN)	JIS K0102 45.5
全燐 (TP)	JIS K0102 46.3.1
pH	JIS K0102 12.1
TOC	JIS K0102 22.2
NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N	JIS K0102 35.3
透視度	JIS K0102 9

3.結果および考察

3.1 調査結果（BOD75%値の比較）

各地点におけるBOD75%値は荒砥川上流の神沢橋の地点で既に汚濁が進んでおり、その後、観音橋で上昇し、上荒砥橋で低下する。その後、上荒砥橋から曲輪橋にかけて上昇し、再び木三橋で低下した（図2）。今回調査した最上流地点である神沢橋を含めて、環境基準（BOD 2 mg/L以下）を達成した地点はなかった。なお、神沢橋の上流に位置する赤城温泉郷北における2020年度のBOD 75%値は0.5 mg/L（県）であり、環境基準を達成している。一般に、河川の水質は下流ほど悪化するが、荒砥川流域の水質では、一度悪化したのちに、下流部で改善がみられる結果となった。このような改善傾向を示した原因は不明であることから、さらに調査を行っていく必要がある。

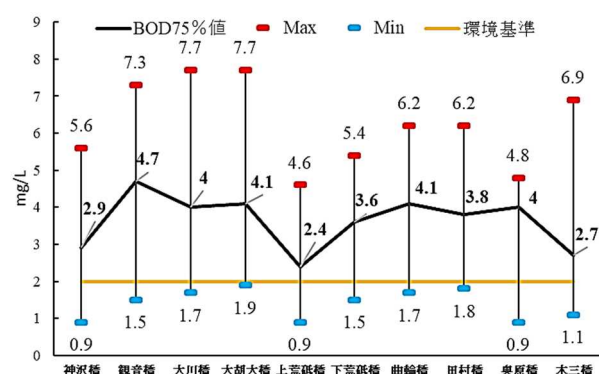


図2 各地点のBOD75%値と最大値、最小値

3.2 調査結果（TNと降水量）

TNの年平均値、および月次変化と降水量（気象庁）を図3に示す。

TNの年平均値（図3上）は、神沢橋から大胡大橋にかけて上昇し、上荒砥橋で低下、その後、曲輪橋にかけて再び上昇し、木三橋にかけて徐々に低下した。この変動は、BODと同じ傾向が見られた。

TNの月次変化（図3下）は、神沢橋のみ年間を通じて低い値で変動が小さいが、その他の地点は神沢橋に比べ高い値で推移し、変動が大きかった。

また、TNと降水量の相関を調べたところ、神沢橋で0.909、観音橋～上荒砥橋で0.674～0.316、下荒砥橋～木三橋-0.316～-0.538であった（表2）。神沢橋のTNと降雨の極めて強い相関の要因は、

生田ら（1995）が報告しているとおり、降雨により流出した森林土壌からの影響を強く受けたためと考えられた。その他の地点は、窒素と降水量との相関が神沢橋ほど強くないことから、降雨による森林土壌からの流出以外の窒素の供給源である、生活排水や畜産排水の影響があると考えられた。

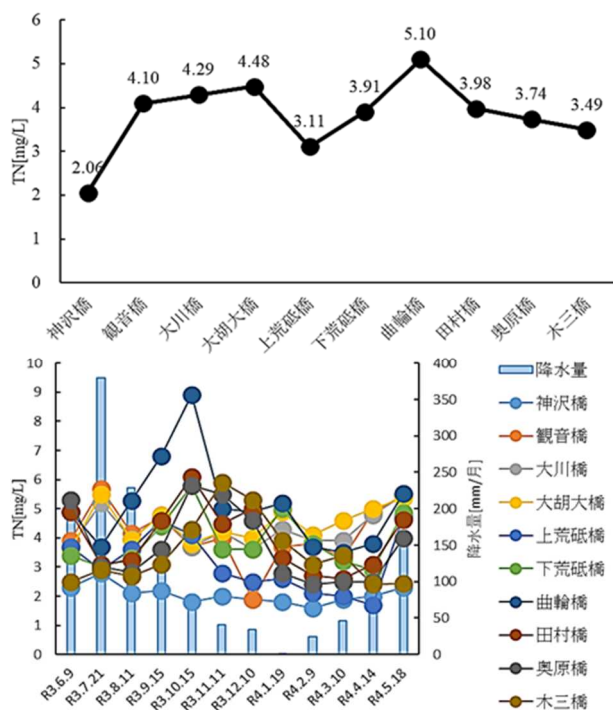


図3 各地点のTN年平均値（上）、TN月次変化と降水量（下）

表2 TNと降水量の相関係数

神沢橋	観音橋	大川橋	大胡大橋	上荒砥橋
0.909	0.675	0.503	0.348	0.316
下荒砥橋	曲輪橋	田村橋	奥原橋	木三橋
-0.365	-0.144	-0.113	-0.106	-0.538

3.3 調査結果（TPと降水量）

TPの年平均値、および月次変化と降水量（気象庁）を図4に示す。

TPの年平均値（図4上）は、神沢橋で他の地点に比べて著しく低い値であり、観音橋・大川橋・大胡大橋において高い値が確認され、上荒砥橋で低下した後、同程度の値であった。

TPの月次変化（図4下）では、神沢橋は年間を通じて低い値で安定しており、その他の地点は変動が大きかった。

また、TPと降水量との単純相関を調べたとこ

ろ（表3）、全地点で相関係数が0.15～-0.25であり強い相関はみられなかった。

TP（図4下）が4月のみ神沢橋を除く地点で比較的高い値が記録されているが、今回の採水は4月のみ降雨時の採水であったことから、石川ら（2019）、佐野ら（1983）の報告にあるとおり、畑等の面源、面源から河川への経路の堆積物の他、河床堆積物の巻き上げによるものに起因した懸濁態リンの流出により、TPが増大したものと考えられる。しかし、TPは降水量の多い7月に低い値を示し、降水量が少なくなる1月にかけて徐々に高い値を示していることから雨水による希釈の影響もある。7月から1月にかけては、リンの供給量と雨水による希釈の影響を比較した場合、供給量よりも雨水による希釈の影響が大きいと推測された。

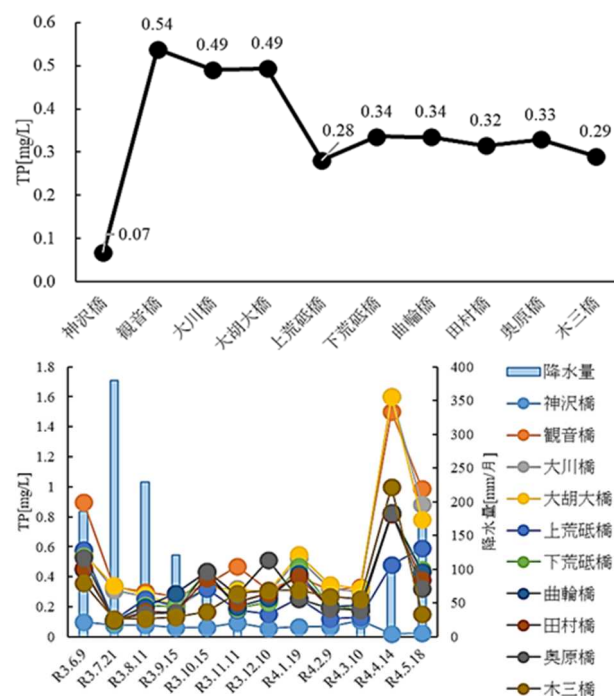


図4 各地点のTP年平均値（上）、TP月次変化と降水量（下）

表3 TPと降水量の相関係数

神沢橋	観音橋	大川橋	大胡大橋	上荒砥橋
-0.017	0.102	0.025	0.014	0.147
下荒砥橋	曲輪橋	田村橋	奥原橋	木三橋
-0.146	-0.176	-0.184	-0.200	-0.217

3.4 調査結果（N/P比）

N/P比の年平均値（図5上）は、神沢橋がその

他地点に比べて突出して高く、観音橋で急激に低下し、その後、下流に行くにつれて緩やかに上昇した。N/P 比の月次変化（図 5 下）をみると、4 月に神沢橋のみ著しく増大しているのに対し、その他の地点は大きく減少していた。これは、神沢橋の水質が前述した降雨により流出した森林土壌から窒素が溶出した影響を強く受けていると考えられた。その他の地点は、窒素の供給源（流出した森林土壌からの溶出）よりもリンの供給源からの影響が大きいことを示している。

N/P 比の月次変化（図 5 下）から神沢橋を除く 9 地点は、年間変動が大きい。変動が大きい地点は、窒素やリンの供給が大きく変動していることを意味し、佐野ら（1983）の報告にあるとおり人為的供給源（生活排水、畜産排水、工場排水、または農業排水）が強く影響しているといえる。特に、リンの供給に関しては、畜産活動の大規模化や大量の施肥による増大が報告（Nengwang Chen ら、2012）されていることから、観音橋から下流の汚濁負荷は自然的要因ではなく人為的要因によるものと推測された。しかし、今回の調査では、具体的な発生源までは特定できなかった。

また、BOD（図 2）、TN（図 3 左）、TP（図 4 左）の低下が確認された上荒砥橋および木三橋の上流を衛星画像（川の名前を調べる地図）で調査した。上荒砥橋とその上流の大胡大橋の間で、横町川が合流し、木三橋の直上で、神沢川および宮川が合流していた。

BOD、TN、TP 濃度の低下は、各地点間が数 km 以内であることから特定の区域のみが強力な自然浄化による改善ではないと考えられる。今回、荒砥川に合流するこれら支流（横町川、神沢川、宮川）の水質測定を行っていないため、原因の特定までは至っていないが、支流の測定を行うことで濃度が低下した原因の究明につながると考えられる。

3.4 乖離原因（仮説）

梅澤ら（2022）は、荒砥川流域環境基準点である奥原橋の直近 5 年（2015 年～2019 年）の BOD75% 平均値は 4.0 mg/L（以下「実測値」）と推計した 2018 年度 BOD は 2.89 mg/L（以下「推計値」）を比較すると、推計値が実測値より低

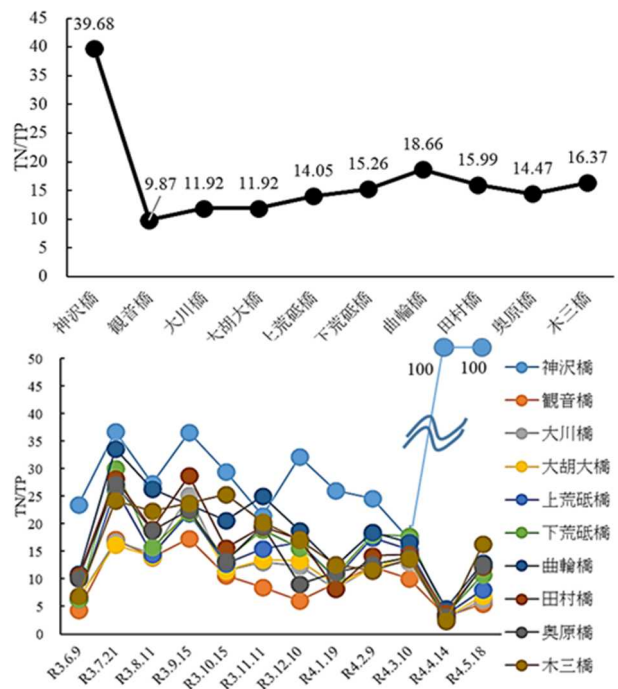


図 5 各地点の TN/TP 年平均値（上）、TN/TP 月次変化（下）

く、乖離があったと報告している。この乖離原因の推定するためには、梅澤ら（2022）が行った推計方法の詳細を理解する必要がある。

河川の汚濁解析は、原則として、汚濁源から排出される排出負荷量が水路・支川を通過して対象水域へ到達するまでの過程と、河川を流下する間に河川の自浄作用（微生物による有機物の分解や土壌との反応・吸着等）により浄化される過程とに分けて行う。このため、ブロックごとに集計した排出負荷量が水路、支川等を経て対象水域へ到達する割合（到達率）と到達した負荷量が水質基点に到達する割合（浄化残率）を設定する。到達率と浄化残率を乗じたものを流出率としている（図 6）。

排出負荷量の推計方法は、生活系、施設系、産業系、畜産系、観光系および自然系の 6 区分とし、それぞれ原単位法により算出し、算出された各種負荷量に「利根川流域別下水道整備総合計画計画説明書」（以下、「流総計画」という。）で用いられている到達率・浄化残率を乗じて現況の河川環境基準点に達する負荷量（流出負荷量）を計算している。これら 6 区分の流出負荷量を流域ごとに合計し、水質基点（環境基準点等）における水量で除して推計値（BOD）としている。

この推計モデルで推計値が実測値より低くなるパターンは、2つ考えられる。1つ目が推計汚濁負荷量（原単位、流達率・浄化残率）を実態より過小評価していること。2つ目がBODを算出するために流出負荷量を除する水量（環境基準点等）が実態より大きいことである。次に、これら2つの可能性について、検証した。

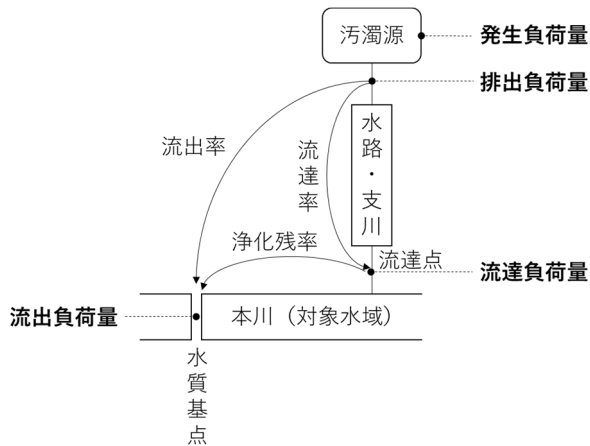


図6 負荷流出の概念（出典：流総計画）

3.5 汚濁負荷量の過小評価（原単位）

汚濁負荷量を過小評価している可能性は低いと考えられる。荒砥川流域の負荷量は、生活系、畜産系で7割以上を占めていると報告（梅澤ら、2022）があるため、この2つの区分の推計方法を詳細に説明し、汚濁負荷量を過小評価している可能性が低い理由を示す。生活系の汚濁負荷量は、流域内の人口を単独処理浄化槽、合併処理浄化槽、計画収集および自家処理の原単位を乗じて算出している。なお、荒砥川流域内に下水処理施設・農業集落排水施設・コミュニティプラントがないため、これらからの負荷はない。畜産系の負荷量は、豚・肉用牛・乳用牛の頭数に各原単位を乗じて算出している。この推計モデルで、荒砥川流域の生活系や畜産系の原単位がその他の流域と異なることは考えにくい。加えて、この推計モデルによる推計値は、一部流域を除き実測に近い値を算出できている（梅澤ら、2022）。精度よく推計できた地域のうち、荒砥川流域と同じく生活系および畜産系の負荷量の割合が高い流域もあることから、生活系・畜産系の原単位の設定は適当であると考えられた。

3.6 汚濁負荷量の過小評価（流達率、浄化残率）

流達率・浄化残率について検証する。荒砥川流域の推計における流達率（設定範囲は0~1）は、生活系：0.8、産業系：0.6、畜産系：0.3、観光系：0.6、自然系：1.0とし、浄化残率は0.9215としている。それぞれ流達率と浄化残率を乗じた値を算出すると、最小となる畜産系が0.2764、最大となる自然系が0.9215となる。したがって、荒砥川流域での負荷の割合が高いと考えられる畜産系負荷が水質基準点に到達する割合は3割に満たない設定としている。

そこで、汚濁発生源と測定地点との距離の寄与度を考察するため、BODが上昇した地点周辺の事業場（水質汚濁防止法に基づく特定施設）を調査した。BODの上昇が確認された観音橋上流域の支流近傍に複数の畜産事業場が集中していた。これらの畜産事業場の汚濁負荷量の到達割合が3割に満たないとしており、この流達割合の設定が乖離の主の原因である可能性は高い。しかし、今回は、畜産事業場の周辺から流入する支流で採水を行っていないため影響を判断できなかった。当該支流の汚濁負荷量（濃度）を正確に捉えることは、乖離の解決に向けての課題である。

また、BODの上昇が起こる曲輪橋上流域では、単体であるが規模が大きいA事業場の排水が本川に直接排出されていた。今回の推計値への影響を確認するため再計算を行ったところ、A事業場の汚濁負荷量が荒砥川流域に計上されていなかったことが判明した。そこで、A事業場からの汚濁負荷量を計上し、推計値を算出したところ、推計値は0.07 mg/L増大し、2.96 mg/Lとなった。しかし、本推計においては、本川に隣接し事業場排水を直接放流している事業場からの発生負荷量についても、一律に流達率（産業系：0.6）を掛けている。実態をよりよく捉えるためには、本川に直接放流している事業場については、流達率を1として算出することが適当である。通常は個々の発生源に対してそれぞれ流達率を設定することは困難であるが、A事業場の排出負荷が荒砥川本流に与える影響が大きいため、流達率を1（すべて河川に排出）、浄化残率0.9215を乗じるとして再計算を行ったところ、推計値は0.11 mg/L増大し、3.00 mg/Lとなり、実測値に近づく

結果となった。したがって、河川に直接放流する事業場については、流達率の設定を見直す余地はあると考えられた。

加えて、区分別の汚濁負荷量のうち相当量（流域の1割程度）を占める汚濁源が直接放流や専用排水路等によって本川に排出されている場合は、個別の流達率を設定することもある（国土交通省、社団法人日本下水道協会、2015）ため、荒砥川流域の産業系排出負荷量とA事業場からの排出負荷量の割合を確認した。流域の負荷量は27 kg/日、A事業場からの負荷量は11.66 kg/日であり、約43%を占めていた。A事業場と同様に、各区分の排出負荷量の相当量を占める汚濁源に対する個別の流達率の設定は、さらなる推計精度の向上につながる可能性がある。しかし、今回の調査では、具体的な流達率の設定や汚濁発生源と水質基点との距離を定量的に評価するには至らなかった。

3.7 環境基準点の水量のずれ

推計値で採用した奥原橋の低水流量（1.09 m³/s）と比較するため、流量の測定を試みた。流速は測定できたが、水深が測れず、流量を算出できなかった。水深が測れなかった理由は、①橋の直下で本流が分岐していたこと、②水深が浅く超音波測深器では測定ができなかったことである。これらを解決するため①流速の測定地点を本流が分岐する前の地点にすることや、②水深の測定は超音波ではなく直接測定（測深棒等）することで解決できる。今後、上記の対策を検討し、正確な水量による推計値の算出によりずれの解消を図れると考えられる。

4.まとめ

本調査により、荒砥川流域の窒素・リンの変動が大きいことから主な汚濁原因が、人為的汚濁源であると確認された。この結果を受け、人為的汚濁源の調査や推計モデルの計算方法を見直すことにより、推計値の乖離の主な原因は、畜産系排出負荷量に対する流達率（0.3）の過小評価、または推計値算出に採用した環境基準点の低水流量が過大であると推定された。また、本川に直接放流される汚濁量の流達率を修正することで推計精度が向上した。

今後の課題は、畜産系流達率の設定に必要な観音橋上流の支流の汚濁負荷量（特に畜産系）と流量の把握が必要である。そのため、観音橋上流の支流の測定を新たに加えた測定地点や測定項目の見直し、および測定機器を検討していきたい。

謝辞

本調査への協力と各種情報提供をいただきました前橋市（環境森林課）の皆様には感謝申し上げます。

文献

- 群馬県環境森林部環境保全課. 2012. 平成23年度群馬県流域別環境基準維持達成計画調査報告書, 33.
- 群馬県環境森林部環境保全課. 2021. 群馬県流域別環境基準維持達成計画（2021-2025）, 46-47.
- 群馬県環境森林部環境保全課. 令和2年度公共用水域水質測定結果. <https://www.pref.gunma.jp/04/e0900241.html>（2022.8閲覧）
- 群馬県. 2011. 利根川流域別下水道整備総合計画計画説明書, 139.
- 生田和義, 藤山英保, 長井武雄. 1995. 森林小流域からの降雨時窒素流出の解析. 日本土壤肥料学雑誌, **66(4)**:396-403.
- 石川裕一郎, 岩田杉夫, 森下一行, 牧野稚佳, 牧原秀明, 丸山貴之, 鈴木全. 2019. 浜田川の水質変動と降雨時の汚濁負荷の調査結果について. 愛知県環境調査センター所報, **47**:29-33.
- 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 社団法人日本下水道協会. 2015. 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説. 85-87,
- 気象庁. 前橋降水量の月合計値（mm）, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3.php?prec_no=42&block_no=47624&year=&month=&day=&view=p5（2022.8閲覧）.
- 川の名前を調べる地図. <https://river.longseller.org/rc/8303030661.html>（2022.8閲覧）
- Nengwang Chen, Benrong Peng, Huasheng Hong, Nicholas Turyaheebwa, Shenghui Cui, Xiujuan Mod. 2013. Nutrient enrichment and N:P ratio decline in a coastal bay river system in southeast China: The need for a dual nutrient (N and P) management

strategy. *Ocean & Coastal Management*, **81**:7-13.

佐野方昴, 鶴田藤作, 山野内隆英, 坂部孝夫, 伊藤正幸. 1983. 窒素・リンからみた豊川流域河川の特徴. 愛知県公害調査センター所報, **11**:86-95.

梅澤真一, 田子博. 2022. 群馬県内河川の流域別汚濁負荷量調査と水質予測. 全国環境研会誌, **47**:45-49.