

矢作川下流域砂河川砂州の伏流流動による 脱窒能の変遷

尾花 まき子¹・戸田 祐嗣²・辻本 哲郎³

¹正会員 名古屋大学特任助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市中千種区不老町)
E-mail:mobana@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
E-mail:ytoda@cc.nagoya-u.ac.jp

³フェロー会員 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
E-mail:ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

河川に形成される砂州は、河川環境の重要な一つのシステムであり、その管理において、砂州上に存在するどのサブ景観が砂州の環境機能を発揮する上で重要であるのかを明確にすることは喫緊の課題である。本研究では、その明確化に向けて砂州景観が保有する生態系機能のうち、生態系サービスとして直接的に河川環境改善に貢献する物質循環機能に着目する。矢作川下流域の砂河川セグメントを対象として、航空写真や横断測量、水質データ等既往の情報と数値解析を用いることにより、砂州の脱窒能を定量化する仕組みを構築した。さらに、砂州が有する脱窒能の過去からの変遷を考察した。その結果、砂州上植生の空間的分布形状の違いが砂州が担う脱窒能に差異を生み出すとともに、特に植生域上流側でその機能が卓越していることが明らかになった。また砂州の脱窒能の変遷の検討から、経年的にみて砂州の植生化が脱窒能の増加を担っているが流域からの環境負荷と総体的に見ることが重要であることが分かった。

Key Words : nutrient transport, sandy river, sub-surface flow, ecosystem service, denitrification

1. まえがき

交互砂州河川の管理目標として挙げられている「砂州景観の保全と整備」に向けて、砂州の環境機能が発揮される上で砂州のどの部分が重要であるのかを明確にすることは喫緊の課題である¹⁾。そこで、砂州景観の河川に対する寄与の明確化が重要であると考え、本研究では、生態系サービスとして直接的に河川環境改善に貢献する物質循環機能に着目する。その中でも、窒素・リンの除去といった水質浄化を取り上げ、特に砂州伏流中の窒素動態の内、「真の浄化」と言われる伏流環境下での脱窒能を指標とする。

砂州の水質浄化に関わる脱窒反応については、これまでも種々の調査報告があり、表流水が砂州を伏流する過程での微生物作用による有機物や無機態窒素の酸化分解が確認されている²⁾。一方、図-1に示すように砂州景観は裸地域や植生域などさらに小さなスケールの景観要素から構成されており、景観要素と関連した土壌特性や

比高の違いは伏流挙動や物質輸送特性に影響を与える^{3,4,5)}ほか、洪水によって運搬される物質を貯留する役割も有し⁶⁾、それらは脱窒に影響を与えることが考えられる。また、砂州上の植生域での脱窒ポテンシャルの卓越が既往研究によって明らかにされている^{7,8,9)}ことから、著者らは伏流フラックスと植生の分布形状が考慮できる水・物質輸送モデルを、現地調査に基づいて構築した¹⁰⁾。

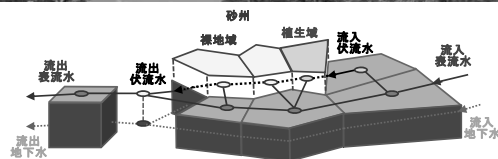


図-1 伏流流動による砂州景観要素の連結性

本研究では、矢作川下流域の交互砂州セグメントの中から特定されたリーチ区間を対象として、砂州一対が有する脱室能を、航空写真や横断測量、水質データ等既往の情報と数値解析を組み合わせることで定量化する仕組みを構築する。さらに、砂州が有する脱室能の過去からの変遷を考察する。

2. 研究対象地の概要

本研究で対象とする河川は、伊勢湾流域圏を流れる10本の一級河川のうちの一つである矢作川である。矢作川は、その水源を南アルプス南端、長野県下伊那郡に発し、巴川や乙川などの支川を合わせ、矢作古川を分派して三河湾に注ぐ、幹線流路延長117km、流域面積1,830km²の一級河川である。矢作川流域は西南日本内帯に位置しており、流域の地質は主に領家花崗岩類から構成されている。マサ化し崩壊しやすい地表の花崗岩は、多量の土砂となって河川の流れに沿って下流へ運搬されるため、矢作川は典型的な砂河川の様相を呈している。

矢作川の水質環境は、1960年代の高度経済成長期には砂利採取や工場排水の影響で悪化していたが、近年では大腸菌群数や溶存酸素量を除いて、明治用水頭首工までの中流域では概ね環境基準を達成している。しかし、下流域に合流する支川では水質の悪化が見られる水域もあり、本川下流域としては環境基準に適合しているものの、汚濁の進行が認められる¹⁾。

研究対象とする区間は、矢作川下流域の乙川合流地点から矢作古川分派地点（河口から約14～20km）までの支川の流入がなく河口からの塩分遡上の影響も受けない6km区間であり、その河道内には6個の交互砂州が形成されている。その中でも、セグメントの特徴を表すNo.3とNo.4の砂州から成る1リーチに着目した（図-2参照）。

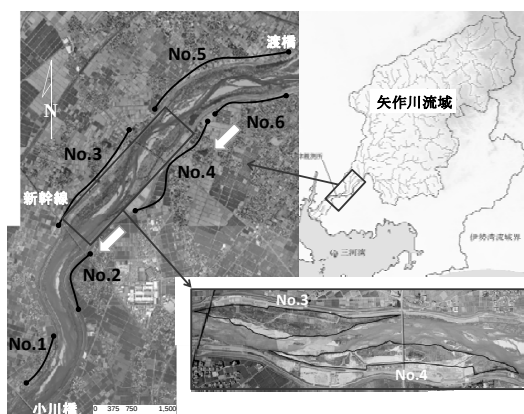


図-2 矢作川流域図と対象区間

3. 砂州景観分類とその変遷

砂州の脱室能を推定するために、それに影響を与える砂州の平面地形と植生分布形状を把握することは重要である。まず始めに、対象区間における過去に撮影された航空写真のうち、砂州や植生分布形状に特徴的な変化が見られる過去5カ年の航空写真を抽出した。抽出した航空写真とGIS（地理情報システム）を用いることにより、砂州を構成する植生域や裸地域などの景観要素に分類し、各々の砂州地形特性（平面形状や周長）や植生分布形状などの特徴を捉えた。算出した対象リーチ砂州の景観特性の変遷を図-3に、また砂州平面形状と植生分布の特徴の変遷を図-4に示す。

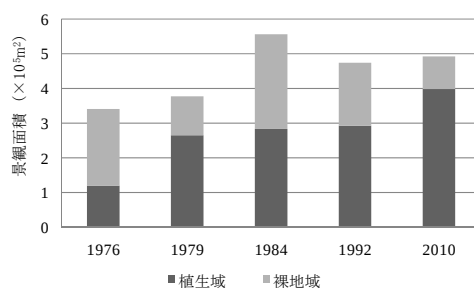


図-3 対象リーチ砂州の景観特性の変遷

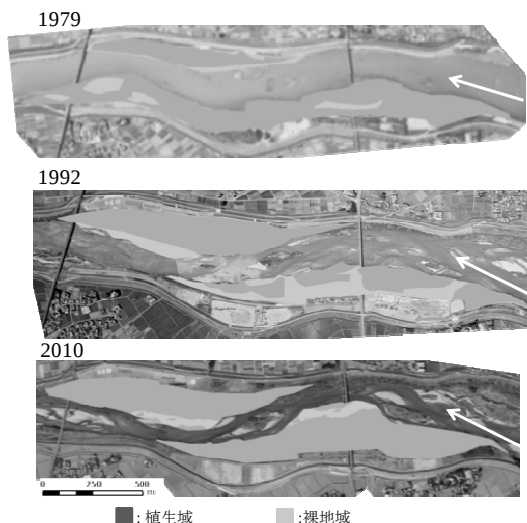


図-4 対象リーチ砂州の平面形状と植生分布の変遷の例

2010年の航空写真である図-2を見ると、砂州No.3より上流側区間は河道内の大部分が植生で覆われていることから分かるように、過去約35年間で砂州の拡大とともに、特に植生域が増加したことがこの区間の特徴である事が図-3より知られる。また、横断測量資料と併せて図

-4の結果を分析すると、経年的な砂州比高の増大とともに、河川堤防側から横断方向への植生の拡幅が見られる。矢作川流域では、流域での人口稠密化と経済産業の活発化に伴い1960年代後半から70年代前半にかけて、治水・利水需要を高めるために矢作ダムを始め7つのダムが建設された他、砂利採取も積極的に行われた。それらは、流域住民に安全と豊かな暮らしを提供した一方、土砂の連続性の遮断や洪水攪乱頻度の減少を引き起こし、その結果として河床低下や河床材料の粗粒化、また砂州の固定化といった変質が河道内に現れた。これらは、上記の砂州陸域の拡大や植生域増加の一要因ともいえる。

4. 砂州伏流水・物質輸送解析の手法

本研究では、砂州伏流に伴う脱窒能を定量化するため、伏流水流動と伏流に伴う窒素の形態変化に関する数値解析を実施した。解析は、伏流水流動解析と物質輸送解析により構成される。

(1) 伏流水流動解析

砂州内部の伏流水を不圧地下水流れとし、平面二次元解析を実施した。解析対象地である砂州にて検土杖を用いて土質の鉛直構造を計測した結果、砂州伏流水水位より1m程度下方に難透水性粘土層がほぼ水平に存在し、その上部に比較的均質な帯水層が存在していることが分かった¹⁰⁾。このため解析では、水平な下流難透水層上の伏流水流動に対して、Dupuit-Forchheimerの仮定が成立するものとして、浸透層に関して鉛直積分された次式を用いて流動解析を行った。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここに、 h ：地下水位、 λ ：間隙率、 k ：透水係数である。

(2) 物質輸送解析

本解析で考慮した砂州伏流流動中の窒素循環過程を図-5に示す。解析対象とする窒素の形態としては、無機態の窒素3態である。アンモニウムイオン、硝酸イオン、亜硝酸イオンとし、それぞれの窒素当量濃度を C_{NH_4-N} 、 C_{NO_3-N} 、 C_{NO_2-N} と記すこととする。

砂州伏流水流動中における微生物反応を考慮した無機態窒素濃度（ C_{NH_4-N} 、 C_{NO_3-N} 、 C_{NO_2-N} ）に関する移流分散方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + R_i \quad (2)$$

ここに、 u 、 v ：浸透層鉛直平均流速、 D ：分散係数、 R_i ：生物化学反応項である。下付添字 i は窒素3態（ NH_4-N 、

NO_3-N 、 NO_2-N ）の区別を表わす指標である。生物化学反応項 R_{NH_4-N} 、 R_{NO_3-N} 、 R_{NO_2-N} については、それぞれ、図-5中の濃い黒矢印で示した生物化学反応の組み合わせにより以下となる。

$$R_{NH_4-N} = R_{DNH_4} - R_{NS} \quad (3-a)$$

$$R_{NO_3-N} = R_{NB} - R_{DA} \quad (3-b)$$

$$R_{NO_2-N} = R_{NS} - R_{NB} + R_{DA} - R_{DI} \quad (3-c)$$

ここに、 R_{DNH_4} ：脱アミノ反応速度、 R_{NS} ：アンモニア酸化速度、 R_{NB} ：亜硝酸酸化速度、 R_{DA} ：硝酸還元速度、 R_{DI} ：亜硝酸還元（脱窒）速度であり、それぞれ以下のように定式化される。

$$R_{DNH_4} = k_{DON} \cdot NH_4 \cdot C_{DON} \cdot X_H \quad (4-a)$$

$$R_{NS} = \frac{1}{Y_{NS}} \mu_{NS} \cdot \frac{C_{DO}}{K_{S,NS,DO} + C_{DO}} \cdot X_{NS} \cdot \frac{C_{NH_4}}{K_{S,NS,NH_4} + C_{NH_4}} \quad (4-b)$$

$$R_{NB} = \frac{1}{Y_{NB}} \mu_{NB} \cdot \frac{C_{DO}}{K_{S,NB,DO} + C_{DO}} \cdot X_{NB} \cdot \frac{C_{NO_2}}{K_{S,NB,NO_2} + C_{NO_2}} \quad (4-c)$$

$$R_{DA} = \frac{1}{Y_{DA}} \mu_{DA} \cdot \left(1 - \frac{C_{DO}}{K_{S,DA,DO} + C_{DO}} \right) \left(\frac{C_{DOC}}{K_{S,DA,DOC} + C_{DOC}} \right) \cdot X_{DI} \cdot \frac{C_{NO_3}}{K_{S,DA,NO_3} + C_{NO_3}} \quad (4-d)$$

$$R_{DI} = \frac{1}{Y_{DI}} \mu_{DI} \cdot \left(1 - \frac{C_{DO}}{K_{S,DI,DO} + C_{DO}} \right) \left(\frac{C_{DOC}}{K_{S,DI,DOC} + C_{DOC}} \right) \cdot X_{DI} \cdot \frac{C_{NO_2}}{K_{S,DI,NO_2} + C_{NO_2}} \quad (4-e)$$

ここに、 Y ：菌体収率、 μ ：比増殖速度、 X ：菌体濃度、 K_S ：半飽和定数、 k ：加水分解速度であり、下付添字について、 DNH_4 ：脱アミノ反応、 NS ：アンモニア酸化、 NB ：亜硝酸酸化、 DA ：硝酸還元、 DI ：亜硝酸還元、 NH_4 ：アンモニウムイオン、 DO ：溶存酸素、 NO_2 ：亜硝酸イオン、 NO_3 ：硝酸イオン、 DOC ：溶存態有機炭素、 DON ：溶解性有機窒素、 H ：通性嫌気性細菌を示す。

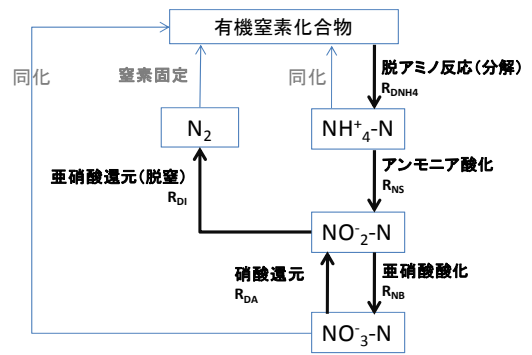


図-5 窒素循環過程

(3) 解析条件

流動解析における境界条件について、河川水域との境界部では平水時の河川水位を与え、砂州陸側との境界部においては、横断方向の濃度勾配をゼロとした。解析で用いた透水係数は、著者ら¹⁰⁾による現地観測結果に基づいて裸地域、植生域でそれぞれ $k=5.0 \times 10^{-3}$ (m/s), 2.0×10^{-5} (m/s)とした。物質輸送解析における境界条件については、河川から砂州側へ伏流水が流入する部分においては河川水質値 C_{NH4-N} , $C_{NO3-N+NO2-N}$ を与え、砂州から河川へ流出する部分については、流出方向への濃度勾配をゼロとし、砂州陸側との境界部分においては横断方向の濃度勾配をゼロとした。生物化学反応に関するパラメータは、裸地域や植生域といった景観要素に依存すると推定される溶存酸素濃度、溶存有機炭素濃度、溶解性有機炭素濃度については、現地観測で得られた各々の平均値を用いて、砂州全体へ空間分布させた。これらを表-1にとりまとめて示す。

表-1 解析で用いた有機物及び酸素濃度

	C_{DON}	C_{DOC}	C_{DO}
裸地域	0.04	0.75	4.0
植生域	0.08	1.5	2.0

その他のパラメータである土壌中の菌体濃度や微生物増殖速度などについては必ずしも十分な情報が得られていないため、これらについては裸地域と植生域で同じ値として表-2のように与えた。

表-2 解析に用いた生物化学反応パラメータ

	R_{DNH4}	R_{NS}	R_{NB}	R_{DA}	R_{DI}	出典
X (mg/l)	0.50	0.30	0.10	1.0	3.0	宗宮 ¹⁰⁾
Y (mg/cell/mg)		0.13	0.05	0.60	0.72	楠田 ¹⁰⁾
μ (s ⁻¹)		5.3×10^{-6}	8.3×10^{-6}	1.1×10^{-5}	2.0×10^{-4}	楠田 ¹⁰⁾
K_S (mg/l)		5.0	5.0×10^4	1.0×10^3	5.0×10^4	楠田 ¹⁰⁾ 仮定値
$K_{S,DO}$ (mg/l)		0.20	0.20	0.20	0.20	楠田 ¹⁰⁾
$K_{S,DOC}$ (mg/l)				0.70	9.0	仮定値
k (l/mg/s)	2.2×10^{-7}					楠田 ¹⁰⁾

5. 景観変遷による脱窒能変化の数値解析

(1) 数値解析における砂州景観変化の想定

本論文では、砂州景観の変化を砂州の平面地形と植生

域の分布形状に単純化し、第3章で述べた変遷過程に沿って水質浄化機能としての脱窒能の変化を考察する。そこで、図-3に示した各年度の景観特性を有する5ケース(1976, 1979, 1984, 1992, 2010年)について、第4章の数値解析を実行した。

境界条件となる各年度の河川表流水質は、国土交通省の水文水質データベース¹⁴⁾、白金(2004)¹⁵⁾や豊橋河川事務所に提供頂いた資料を参考にして、各々の年度で得た値を平均し表-3に示す値を用いた。その他、生物化学反応に関するパラメータとなる溶存酸素濃度、溶存有機炭素濃度、溶解性有機炭素濃度や各土壌中の細菌濃度等も各年度の環境に応じて変化しているが、ここでは第4章で示した2010年度の現地観測に基づく結果を用いて計算を行った。

表-3 解析に用いた河川水質値(岩津地点)

年代	1976	1979	1984	1992	2010
$C_{NO3-N+NO2-N}$ (mg/l)	0.32	0.38	0.48	0.52	0.60
C_{NH4-N} (mg/l)	0.022	0.022	0.015	0.031	0.010

(2) 数値解析の結果

数値解析の結果は、各砂州での脱窒能の空間分布として表現される。ここでは、図-6に示すように対象区間全体にわたっての脱窒量の総計で比較してみた。結果を見ると、過去約35年で脱窒量は1.4倍になっている事が分かる。伏流流動による砂州の脱窒能は、伏流の流動距離や植生分布の場所(上流側、下流側また水際からの距離)に応じて異なることが分かっている¹⁰⁾。第3章の景観解析によると、過去35年間で砂州面積は1.5倍になり、特に植生域は3.3倍になっているため、砂州景観要素の増加が脱窒能の増加に寄与していると考えられる。

また、図-7に対象リーチにおける脱窒量の空間分布の例(3カ年分)を示す。1992年と2010年を比較すると、砂州面積にほとんど差異はないが、植生域が1.4倍に拡張していることが見てとれる(図-3参照)。植生域での脱窒ポテンシャルが高いことが既往研究により明らかにされているが、図-6に示す脱窒量がそのような傾向を示さないのは、1992年と2010年の植生分布の違いによるものと推察される。図-7の砂州No.4に着目すると、1992年砂州は植生が水際に点在している一方、2010年砂州は河川堤防側に植生がはりついている。二者をコンター図と合わせて考察すると、伏流水流入口のある砂州上流側は脱窒反応に寄与する基質因子が豊富に存在し、水質浄化機能の担い場として効果的な場と言える。同じ水際にある植生でも下流側植生の機能が低いことは、伏流水が砂州を流動する過程で脱窒能を律速する基質因子が低減さ

れているためである。また、水際植生で水質浄化機能が卓越している結果を見ると、表流水と伏流水との水交換によって脱窒の基質因子が供給されることが機能の発現に差異を生んでいることが分かる。1992年と2010年では植生域が増加したにも関わらず、脱窒量に差異が見られない理由として以上のような事が考えられる。

本研究では、各砂州の伏流流動による脱窒量の算定のみに着目し数値解析を行った。しかしながら砂州の伏流流動は、河川流量や供給土砂量の変化によって形成される瀬淵構造によりその流入・流出口が異なり、伏流流動特性を変化させる。また、流入境界条件となる河川表流水質も時々刻々と変化しており、本解析では上記のそれらを一定として取り扱ったが、本来それらの移流分散反応方程式を解析して取り込む事が望ましいため、今後の検討課題とする。

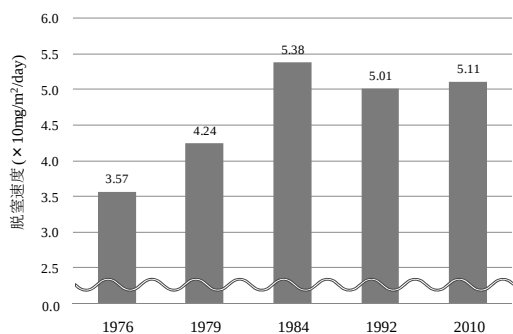


図-6 対象リーチでの脱窒能の変遷

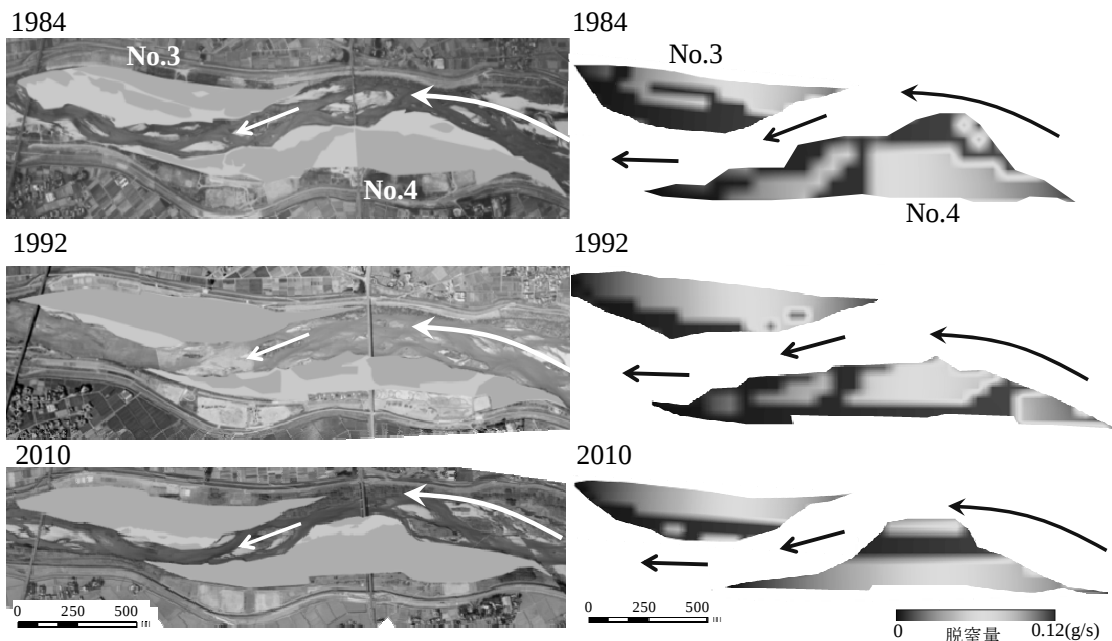


図-7 対象リーチでの脱窒量の空間分布

6. あとがき

本論文では、航空写真、横断測量や河川水質データ等既存の情報を用いて、砂州が有する生態系機能の過去からの変遷を定量的に示す手法を提案した。提案するモデルでは、砂州平面形状や植生分布といった砂州景観の変遷に起因して砂州の脱窒能の変遷過程が明らかになり、対象とした矢作川砂河川の交互砂州リーチでは経年的に脱窒機能が増加していることが見てとれた。

本論文で用いた手法では、各年代の河川水質に基づいて過去の砂州景観の脱窒能を評価している。これによって植生域の増大にみられる景観変遷に伴って脱窒能が増加するという事は確かだといえそうであるが、河川水質やその原因である流域負荷の経年変化とともに議論すべきであろう。例えば、矢作川の中・下流域では、豊田・岡崎・安城市などを含む流域人口の95%が集中する¹⁰⁾ため、さまざまな人間活動にともなう流域負荷が増大していると推測され、矢作川流域では水質保全に向けて矢作川沿岸水質保全対策協議会による“矢作川方式”の導入や豊田市矢作川研究所の設立など古くから様々な努力がなされてきた。それらは水質汚濁改善へ多大な貢献を果たした一方で、過去35年にわたって溶存窒素は平均的に約2倍となっている。河川水質は、すでに河川のさまざまな自浄作用を受けた結果であることも考慮すべきであるが、今回の結果としては、流域環境負荷の増加という傾向に対して砂州の拡大と植生域の増加という景

観変遷で、これを緩和していることを示唆している。

一方、植生域の増加は、砂河川に象徴されるこの河川
の原風景的な景観を変質させており、またそれに伴って
生態系をも変貌劣化させていることも推測され、さらに
総合的な視点での検討が必要である。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省豊橋河川事務
所には、航空写真や横断測量、また河川水質データ等さ
まざまな資料を提供頂きました。ここに記して御礼申し
上げます。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：砂州景観保全を河川生態工学からどう意義づけ
るか、河川技術論文集、第10巻、pp.43-48, 2004.
- 2) 対馬孝治、上田眞吾、小倉紀雄：多摩川永田地区河川敷地
下水における無機態窒素の動態、地球科学、第36巻、pp.15-
22, 2002.
- 3) 中島治美、鷺見哲也、辻本哲郎：木津川裸地における伏流
水の水質特性、河川技術論文集、第10巻、pp.381-386, 2004.
- 4) 鷺見哲也、恒川明伸、辻本哲郎：木津川砂州における植物
生育場の表層物理環境と物質輸送特性に関する研究、河川
技術論文集、第9巻、pp.389-394, 2003.
- 5) 片貝武史、亀井文史、鷺見哲也、辻本哲郎：木津川植生砂
州における伏流水輸送と窒素動態、河川技術論文集、第12
巻、pp.489-494, 2006.
- 6) 辻本哲郎、竹下幸美、尾花まき子、井上佳菜：砂州景観の
生態的機能における生元素の表層貯留の役割、河川技術論
文集、Vol.14, pp.337-342, 2008.
- 7) 中島拓男、安佛かおり、三田村緒佐武：流路河床での脱窒
による窒素除去、河川生態学術研究会木津川研究グループ
木津川の総合研究、Vol.2, pp.377-388, 2008.
- 8) Jacobs, T.C. and J.W. Gilliam: Riparian losses of nitrate from agricultural
drainage waters, Journal of Environmental Quality, Vol.14 (4), pp.472-478,
1985.
- 9) Schade, J.D., S.G. Fisher, N.B. Grimm and J.A. Seddon: The influence of a
riparian shrub on nitrogen cycling in a sonoran desert stream, Ecology,
82(12), pp.3363-3376, 2001.
- 10) 尾花まき子、戸田祐嗣、辻本哲郎、野尻晃平：砂州植生の
分布形状を考慮した伏流流動に伴う脱窒特性、水工学論文
集、第55巻、pp.1363-1368, 2011.
- 11) 鈴木寛、萩原恒昌：矢作川における水質汚濁の状況、矢作
川研究、No.2, pp.247-251, 1998.
- 12) 宗宮功：自然の浄化機構、技報堂出版、pp.164-168, 1990.
- 13) 楠田哲也：自然の浄化機構の強化と制御、技報堂出版、
pp.6-16, 1994.
- 14) 国土交通省河川局：国土交通省水文水質データベース、
<http://www1.river.go.jp/>, 2002.
- 15) 白金晶子：矢作川中流域の水質Ⅱ - 水質の長期変動と他河
川との比較 -, 矢作川研究、No.8, pp.219-228, 2004.
- 16) 高橋香織：都市社会への移行と流域の環境保護 - 森・川・
海と人々 -, 佐光良三編、日本経済評論社、pp.115-191,
2001.

(2011. 9. 8 受付)

TRANSITION OF DENITRIFICATION POTENTIAL DRIVEN BY SUB-SURFACE FLOW IN ALTERNATE BAR REACH OF THE YAHAGI RIVER

Makiko OBANA, Yuji TODA and Tetsuro TSUJIMOTO

The landscape of a river sandbar is composed of several elements, including vegetation, bare areas, side-pools and so on. For sandy river management, it is necessary to determine the contributing factors for the ecosystem functions of alternate bar segments. In recent years, it has been reported that sandbars have a water purification function involving denitrification driven by sub-surface flow, but the details are still unknown. The objective of this study was to develop a model that could be used to examine how the nitrogen is trapped and retained by several elements of a sandbar in an alternate bar reach. We also developed a framework to analyze the temporal change in the denitrification by using a numerical simulation, aerial photos, and a water quality information system. The numerical simulation was performed under the discharge and morphological conditions of the Yahagi River in the Chubu region of Japan.

The main results of this study are that the temporal change in the denitrification ecosystem function in a sandbar reach can be quantified using the proposed model and the denitrification activity has increased over the past 35 years. In addition, it was clearly shown that differences in the vegetation distribution and sandbar shape affect the nitrogen dynamics. Thus, the numerical simulation has made it possible to determine the most effective vegetation patterns to maximize the ecosystem function in a sandbar.