

砂州河川の景観と河川生態系の構造にもとづく 生態的機能評価へのアプローチ -木津川下流セグメントを例にして-

A FRAMEWORK FOR EVALUATION OF ECOLOGICAL FUNCTIONS BASED
ON STRUCTURE OF ECOSYSTEM AND RIVER LANDSCAPE IN SAND RIVER
-CASE STUDY IN THE DOWNSTREAM SEGMENT OF THE KIZU RIVER-

尾花まき子¹・辻本哲郎²
Makiko OBANA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 MSCE 名古屋大学大学院工学研究科研究員 (〒464-8603 愛知県千種区不老町)

²フェロー 工博 名古屋大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻

The ecosystem preservation became one of the purposes for river management as well as flood control and water resources utilization in 1997. In order to understand the structure and functions of ecosystems in sand river, a lot of fragmentary information have been accumulated by cooperated research among river hydraulics, ecology and limnology more than ten years.

The downstream segment with alternate sand bars of the Kizu River is focused on. The information about habitat of typical organisms with their life cycles and material cycle (nutrients-organic matters) are concentrated on the “typical micro-landscapes” as ecological function in a river with alternate bars. By using aerial photos taken since 1967 with the data of cross-section surveys, GIS techniques makes a map of micro-landscapes for each sand bar and it provides the area proportion of respective micro-landscapes. The results indicate that the valuable sand bars are by connecting between respective micro-landscapes and some ecological functions.

Key Words : Structure and functions, sandbar, physical basement, habitat ,material cycle

1. はじめに

1997年の河川法改正により、河川管理の目的に治水・利水とともに河川環境が加えられ、生態系の保全・復元が大きな課題となった。交互砂州河川の環境目標としては、「砂州景観の保全」が掲げられ、河川生態系の構造と機能の解明に向けて、多くの研究や調査¹⁾²⁾³⁾が蓄積されてきているものの、いまだそれらの相互作用の体系的な理解には至っていない。

細かな景観の集合体である砂州は、個々の「場」が生物に生息場を提供し、また生物の生理活動によって物質循環が生起される。一方、河川の適正な管理に向けて、砂州のどの部分が河川生態系にとって重要であるのかを明確にする必要がある。そこで本論文では、生態系としての重要性を判断する鍵となる「生態的機能」(2章で詳述)が、どのようなサブ砂州スケールの類型景観の中で発揮されているのかに着目し、砂州景観の生態的役割を評価するとともに、生態系にとって重要な場の指標化を試みる。

2. 河川生態系の構造と機能

河川生態系は、図-1に示すように (A)物理基盤、(B)生物相、(C)物質循環という3つのサブシステムによって構成されている⁴⁾。(A)物理基盤は、流れ、流砂、地形そして植生が相互作用を及ぼしあっている系から成る。

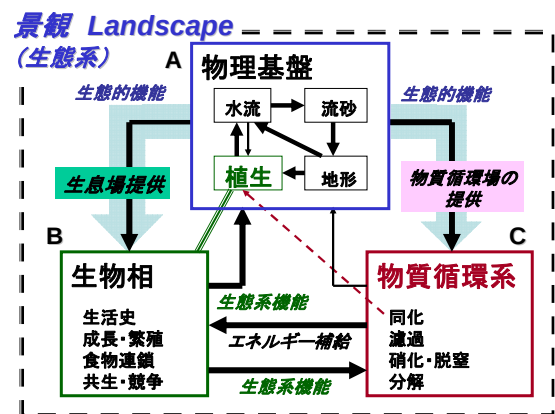


図-1 河川生態系



図-2 木津川流域と研究対象区間

(B)生物相は、生物群の動態として捉えられており、個体や群集、あるいはさまざまな種から構成される。また(C)物質循環系は、生元素の捕捉・貯留・流出のほか、硝化・脱窒といったさまざまな様態での輸送・変化過程を含む。物理基盤は、生物に生息場を提供することによって、また生元素循環はエネルギーフローを介して、生物相と関連している。このように生物相は物理基盤、物質循環に支えられている一方で、両者に反作用を及ぼしていると考えられる。このように、3者の相互作用によって生態系が成り立ち、この生態系が有機的に作用することによって生み出されるサービスが「生態系サービス」(Ecosystem service)といわれている。

本論文では、この相互作用系のうちのとくに物理基盤が、生物に生息場を提供し、また物質循環の素過程の生起場を提供するといった(A)→(B)および(A)→(C)の流れを物理基盤の有する「生態的機能」(Ecological function)と定義し、その二つの機能に着目する。

3. STDによる河川景観構造の階層化

対象とした淀川水系木津川下流部（淀川三川合流地点から約20kmの区間、図-2参照）は、平均河床勾配が1/1150の細かな礫と砂から構成される砂床であり、下流からナンバリングされた20の砂州が存在する。その砂河川交互砂州形成区間（セグメント）をフィールドとして、河川生態に関する学際研究である河川生態学術研究^{2), 3)}が展開され、1998年から10年にわたってさまざまなフィールド研究が蓄積されてきた。河川水理学、地下水文学、陸水学、生物学、生態学などさまざまな分野の研究者によって組織された研究グループは、まず河川の捉え方を統一化して議論するために、STD(Structure, Texture, Duration)という河川の構造をあらわす概念を取り入れた⁵⁾。

縦断勾配、河床材料および背後地景観で特徴付けられ



図-3 木津川とその構造

る「セグメント」の中には、図-3で示す木津川に見られるように、交互砂州が出現するような数年から十年に一度の洪水時に形成されるStructureと呼ばれる河道の骨格構造があり、その区間の代表的な特徴を把握することができる。さらにその区間をクローズアップして砂州の表層被覆の違いを見てみると、より小さい空間スケールのさまざまな類型景観⁵⁾のパッチから成っていることが分かる。Textureは、それらの「サブ砂州スケール類型景観」をさす。滞筋、二次流路やわんど、たまりなどの一時水域、水際、礫帯や細砂マウンドなどの裸地、草地や樹林などの植生域などである。TextureはこのようにStructureの階層構造を有しており、毎年何度か来襲する出水で形成・維持される。この各々の景観の寿命をDurationとした。本論での「景観」とは、上述した移動床過程により形成された場に、生態系が存在し、さらにそれが機能を発揮している状態として定義している。

4. 景観要素の時空間分布特性の把握

先に述べたような河川の構造と機能の概念を背景に、砂州のどの部分で機能が発揮されているのかを明らかにするため、まず「サブ砂州スケール類型景観(Texture)」の客観的な抽出を試みた⁶⁾。航空写真を用いたGISによる画像解析手法と準二次元不等流解析によって算出した洪水規模別の水位を重ね合わせ、サブ砂州スケールの類型的な景観要素を標準的に図化した(図-4参照)。解析に用いた流量条件としては、木津川の流況に基づき、4パターン($Q=1700, 500, 100, 20 \text{ m}^3/\text{s}$)を設定した。各々2~3年に一度程度の大洪水、年に数回程度の中洪水、年に数十回程度の小出水および平水の流量にあたる。

河川景観に用いた分類では、天端・法面・人工物などから成る人工区分と河相区分⁶⁾を考え、後者については異なる生態的機能を有する領域との境界条件ともなる洪

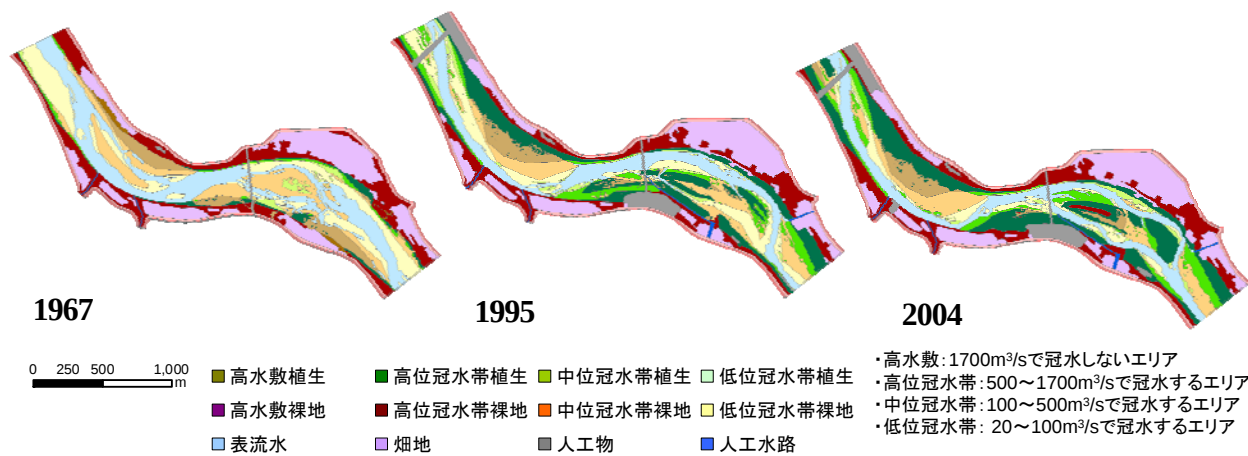


図-4 10, 11番砂州における景観要素分類図の変遷

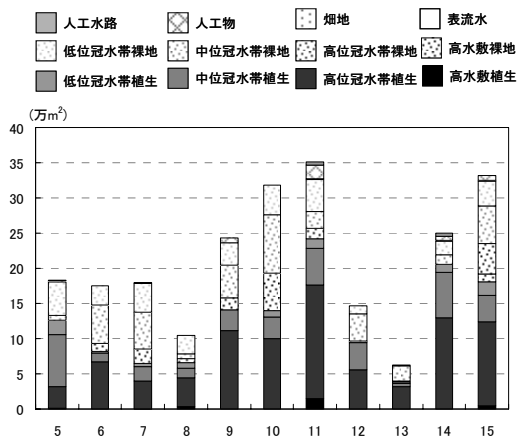
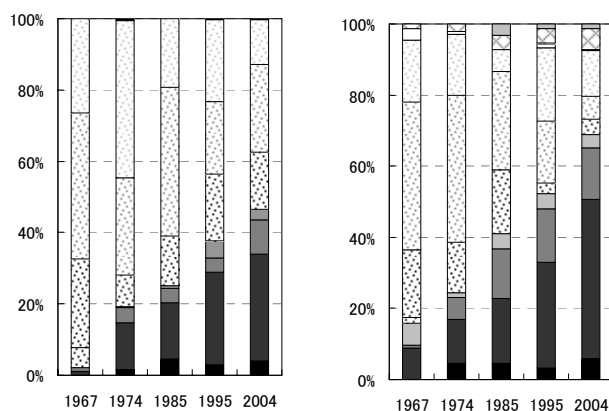


図-5 区間内砂州(5-15番)における景観要素の空間分布



(a) 10番砂州

(b) 11番砂州

図-6 10, 11番砂州における景観要素の変遷

水規模別の冠水幅に着目して細分類し、水位が低いものから順に低位，中位，高位冠水帯，高水敷（便宜的）と名づけた。この景観分類に従い，著者らが現地調査と室内実験によって算出した各景観の物理基盤の条件を整理した結果を，表-1に示す⁹⁾。

特に，表層景観がそれぞれ裸地と植生が卓越している一対の典型的な砂州（以下，各々を10番，11番砂州と呼ぶ。図-3参照）については，過去5ヵ年分の図を作成した。また，区間内の5から15番砂州においては，2004年度の航空写真を用いて各砂州の分類図を作成した。このように，各砂州に占める景観要素の面積比率が算出できたことによって，図-5と図-6に示すように区間内砂州の空間分布特性と10,11番砂州の時間分布特性が把握できた。

結果を考察すると，10，11番砂州では全域において，植生域の割合が経年的に大幅に増大していることが分かる。特に，裸地砂州として認識されている10番砂州において高水敷寄りからの植生域の拡大が目立ってきている。植生砂州と認識されている11番砂州と植生域の面積割合に大きな差は見受けられない。さらに，高位冠水帯の割

合が増加し，低位冠水帯の割合が減少していることから，冠水はするものの比高が高いため，掃流力が弱まり植生

表-1 物理基盤指標の整理(辻本ら⁹⁾，2007)

景観要素		物理基盤指標			
		粒度		比高	冠水率
		30%粒径 (標準偏差)	60%粒径 (標準偏差)		
		(mm)	(mm)		
高位冠水帯	植生	0.65 (±1.12)	2.08 (±4.27)	3.80 ~1.90	1.4
	裸地	1.30 (±0.79)	3.96 (±2.96)		
中位冠水帯	植生	1.01 (±1.04)	2.24 (±2.69)	1.90 ~0.56	12.5
	裸地	1.30 (±0.46)	3.48 (±0.86)		
低位冠水帯	植生	0.79 (±0.68)	1.75 (±1.69)	0.56 ~0.00	63.1
	裸地	1.43 (±0.75)	4.07 (±2.93)		



図-7 チドリ類3種の営巣場（山岸ら⁸⁾）

が土砂や物質を溜め込むことによってさらに比高が高くなることが予測される。また、本セグメント内の砂州は、近年全域的に植生域の割合が高いという特徴が見てとれる。

5. 景観要素が有する生態的機能

物理基盤が、生物に生息場を提供し、物質循環の素過程の生起場を提供するといった二つの“生態的機能”に着目し、木津川研究グループで蓄積された特徴的な場（景観）を利用する機能を抽出する。

(1) 生息場 (Habitat)

木津川研究グループでは、魚類、底生生物、地上昆虫、植物、両棲・爬虫類、鳥類など砂州上で生息するさまざまな生物の種類を調査するとともに、砂州を典型的な生息場とする生物の生態が研究されている⁷⁾。その中でも、特に食物網の上位に位置する鳥類の生息場を生態的機能として抽出した。

木津川の砂州ではチドリとホオジロの生息が山岸・松原ら⁸⁾によって確認されており、各々の生活史によって利用する場を使い分けていることが分かっている。チドリ類は、繁殖や営巣に植生のない砂礫裸地を使い分けており、巣目の水際約100mの汀線で採餌する。営巣場所は、砂礫裸地全域にわたっており、水際からの距離については特に傾向が見られず、また比高についても同様であった。採餌場については、新しい細粒砂やシルトからなる比高の低い水際で採餌していることが確認された。

その他、木津川で確認されたチドリ類3種（コチドリ、イカルチドリ、シロチドリ）の営巣場（図-7参照）については、砂礫裸地の粒径別に営巣場所を選択していることが明らかにされている⁸⁾。

これによって、景観分類図の低位から高位冠水帯裸地域がチドリ類の営巣、繁殖場として利用されており、低位冠水帯裸地域の特に水際部分が採餌場として利用されていることがいえる。

一方ホオジロは、繁殖や営巣場所として草地帯を利用しており、その中でも特にイバラ群落やシナダレスズメガヤに営巣していることが松原らによって確認された。

さらに採餌はほとんどが陸域で行われ、特に植生の際（フリンジ）での採餌が確認された。ホオジロの餌量はフリンジ長によって制限されるため、必要なフリンジ長を含むように行動圏のサイズが決定することが推測できる⁹⁾。以上のことから、低位から高位冠水帯植生域がホオジロの営巣・繁殖場として利用されているということが言える。

チドリ類やホオジロの営巣場所の使い分けについては、今後景観分類図がより細かい分類で作成されると、その景観要素の上に生態的機能をプロットすることが可能になり、同じ冠水帯の中でも生息適正が異なることによって機能値の優劣をつけることが可能となるだろう。

(2) 物質循環の素過程の生起場

物質循環系は、生元素の捕捉・貯留・流出のほか、硝化・脱窒といったさまざまな容態での輸送・変化過程を含む。物理基盤、生物相そして物質循環の相互作用によってもたらされる「生態系サービス」には、さまざまなものが挙げられる。その中でも、木津川では硝酸態窒素の濃度が高く水質課題となっているため、水質浄化に寄与するとされている「脱窒作用」を生態的機能として取り上げる。

木津川の生元素、特に窒素の動態については、すでにさまざまな景観要素上で研究・調査が実施されている。著者らが砂州内の伏流過程による硝酸イオン濃度と安定同位体比変化を同時に調べた結果、伏流過程での脱窒が確認された⁹⁾。その結果、植生域のほうが裸地域よりも脱窒に寄与していることが明らかにされている¹⁰⁾。つまり、景観分類図の低位～高位冠水帯植生域においては、脱窒作用が卓越していることがいえる。

他にも、砂州上の二次流路やたまりでの脱窒活性が高いことが確認されている¹¹⁾。また、低位から高位冠水帯の間でも脱窒の機能面に差異がある可能性が考えられる。砂州上の植生域の脱窒は、おもに有機物が豊富な表層土壌で起きるとされている¹²⁾が、植生域の比高が大きくなると、表層土壌から伏流水面までの距離が大きくなり、伏流水に及ぼす影響が小さくなることが予測されるからである。

本論文では、脱窒が生起する場として、低位～高位冠水帯植生域をまとめて取り上げるが、景観分類がたまりや二次流路、さらに表層土壌から伏流水面までの距離などを含んでより細分類されてくると、景観の中で脱窒が生起する場を複数示することができる。また、これらの景観要素間における脱窒機能の大きさの差異を定量的に示すことができれば、面積のみの重み付けだけでなく、機能の高さに着目した評価が可能となる。

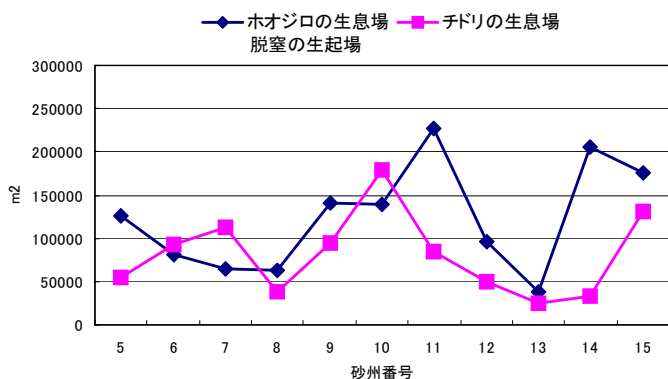


図-8 区間内砂州(5-15番砂州)における生態的機能の分布 (2004年)

6. 砂州の生態的機能

河川の景観管理につながる生態系アセスメント手法の第一歩は、どの景観がどのような機能を有し、さらにその機能の大きさはどれくらいなのかを示すことである。まず、景観分類図を作成したことによって各景観要素の面積配分率が算出され、それらの時間・空間分布が把握できた。さらに、生態的機能として抽出した鳥類の生息場や脱室作用が生起する場は、先述したように各々特定できている。これによって、景観と機能の結びつきが明確になったため、次の段階として、各景観要素で算出された面積比率を機能の大きさに置き換え、それを砂州スケールで統合した。手法としては、各景観要素の面積を A_j 、各景観要素の生態的機能値 (0~1) を γ_j とするとき、各砂州の生態的機能は、次のような WUA (Weighted Usable Area) で定量化される。

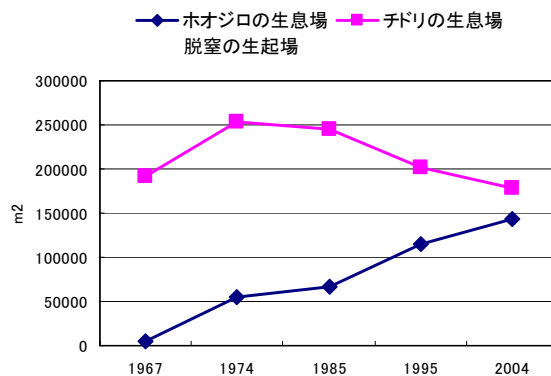
$$WUA = \sum_j A_j \gamma_j \quad (1)$$

これは生息場評価における PHABSIM (Physical Habitat Simulation) の採用である。ここでは、景観要素分類が粗く γ としては 0 か 1 の値を用いているが、今後その精緻化を予定している。

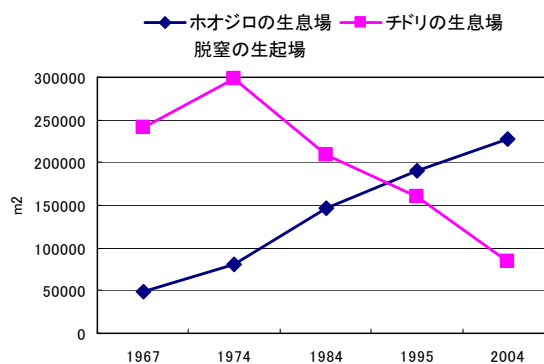
各砂州が有する生態的機能の分布を図-8 に示した。さらに、時間分布をおった一対の典型砂州 (10, 11 番砂州) は、図-9 に示すように各々の砂州が有する生態的機能の変遷が示された。抽出した生態的機能は、チドリ、ホオジロの生息場と脱室の生起場という3項目だが、ホオジロの生息場と脱室の生起場はいずれも低位～高位冠水帯植生域で発現するため一つの指標としてまとめている。各々の結果について以下に考察する。

(1) 区間内砂州における生態的機能の分布

ホオジロの生息場と脱室の生起場に注目すると、11、



(a) 10番(裸地)砂州



(b) 11番(植生)砂州

図-9 10, 11番砂州における生態的機能の変遷

14, 15 番砂州で卓越している。次にチドリの生息場については、10, 15 番砂州で卓越していることが分かる。ホオジロ、チドリの生息場や脱室の生起場など生態的機能の数の多さを良好な砂州の指標と仮定すると、この3者を単純に重ね合わせた砂州の機能評価値としては、10, 11, 15 番砂州が良好な値を示している。内訳を見ると、特に10, 15 番砂州は3者に偏りがなく、平均的に機能が分散されているといえる。

(2) 10, 11 番砂州における生態的機能の変遷

10 番の裸地砂州については、近年高水敷からの植生域の拡大が見られたため、約30年間でホオジロおよび脱室の生起場が飛躍的に上昇している。元来裸地が卓越していると認識されていた砂州であったため、チドリの生息場には適していたが、近年の植生域の拡大から生息場としての機能は減少傾向にあることが見てとれる。一方、植生砂州といわれる11 番砂州では、全域的に植生域が拡大したために植生域と裸地域の割合が約30年間で逆転した。よって、各々の機能についても1990年を境に逆転していることが見てとれる。現在も植生域の拡大は進行しており、今後も人為的改変がないかぎり拡大傾向にあると推察できる。植生域の拡大と裸地域の消失は反比例の

関係にあるため、チドリの生息場が今後縮小する可能性が推察できる。

以上のように、機能の変遷を景観分類図から生態的機能分布図に書き換えることによって、対象区間内のどの砂州の機能が高いのかを指標化することに成功した。しかし、生態的機能として抽出した3項目のうち、2項目は同じ場で発現しているにも関わらず、それによる機能の相違は表現できていない。さらに、本研究では植生域の中でも特徴的な場で生起している現象についても、植生域全域で起こる現象として平均化したが、今後景観の細分類が進むと一層現実の現象に則した機能評価ができるだろう。

6. おわりに

本論文では、砂州景観の生態的機能が砂州上のどのような部分で発揮されているのかを指標化するために、評価枠組を構築し、そのシナリオに沿って河川環境の定量的な評価を試みた。

まず、砂州景観を構成するサブ砂州スケールの類型景観(Texture)を客観的に抽出し、各Textureの面積占有率の砂州別の相違および特定の砂州でのそれらの経年変化を調べた。次に、代表的な生態的機能を選定し、それらの機能が発揮される場の面積比率を機能の大きさに置き換えることによって、砂州景観の生態的機能の時空間特性を明らかにする手法を提案した。それによって、焦燥の課題であった砂州の機能を明確に指標化できた。本研究では、場(景観)の配置やその連結性、さらにはフラックスによる機能の伝播などについては考慮できていないが、河川環境の定量評価へ向けての第一段階として、景観が有する機能のポテンシャルを評価する手法を示せたことは重要である。また、河川の景観管理という視点にたつと、個別の場の機能を評価しておくことは、人為的改変による景観の消失や多自然川づくりによる景観の復元や再生という議論に際しても有用であると考えられる。

今後は、各機能をより現実にもっと近づける形でマッピングするために、景観の細分類が必要となってくる。例えば、チドリ類は、種によって営巣場としての砂礫裸地を使い分けている。ホオジロは、植生域に営巣するがその中でも特に草本帯、イバラ群落やシナダレスズメガヤを選好する傾向が明らかになっている。脱窒能においては、比高の違いによる機能の大きさが異なる可能性が示唆されている。

景観の細分類がなされ、機能をその各々の景観要素にのせられると、同じ冠水帯の中でも機能を発揮する場に優劣がつけられ、より定量的に河川環境を評価することができると考える。

謝辞：本研究は河川生態学術研究(木津川研究グループ)の一部として実施した。また、文部科学省振興調整費による「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」の研究の一部を受け持つものでもある。名古屋大学・安佛かおり研究員には多くの助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Tsujimoto, T., Katakai, T. and Sumi, T.: Sand bar landscape and role of vegetation and subsurface flow on ecosystem service, Proc. 32nd Cong. of IAHR, Venice, Italy, CD-ROM, 2007.
- 2) 辻本哲郎：木津川河川生態学術研究の展開状況，河川技術論文集，Vol.7, pp.351-356, 2001.
- 3) 辻本哲郎：木津川砂州をフィールドとした河川生態に関する生態学・河川水理学共同研究，河川技術論文集，Vol.8, pp.7-12, 2002.
- 4) Tsujimoto, T., Toda, Y. and Obana, M.: Assessment framework of eco-compatible management of river basin complex around a bay, *Advances in Hydro-Science & Engineering*, Vol.8, ICH, CD-ROM, 2008
- 5) 辻本哲郎：河川生態系の評価と保全・再生のための課題，河川技術論文集，Vol.12, pp.105-110, 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) 河川生態学術研究会木津川研究グループ：木津川河川生態総合研究，第2巻，2008(印刷中).
- 8) 山岸哲，松原始，平松山治：木津川河川生態学術研究調査地における鳥類の生態学的研究，木津川の総合研究，pp.569-614, 2003.
- 9) 片貝武史，亀井丈志，鷲見哲也，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，Vol.12, pp.489-494, 2006.
- 10) Anbutsu, K., Nakajima, T., Takemon, Y., Tanida, K., Goto, N. and Mitamura, O.: Distribution of biogeochemical compounds in interstitial and surface standing water bodies in the gravel bar of the Kizu River, Japan, *Arch. Hydrobiol.* 166, pp.145-167, 2006.
- 11) 中島拓男：木津川調査対象砂州の細菌分布と脱窒活性，木津川の総合研究，pp.145-156, 2003
- 12) Schade, J.D., Fisher, S.G., Grimm, N.B. and Seddon, J.A.: The influence of a riparian shrub on nitrogen cycling in a sonoran desert stream, *Ecology*, 82(12), pp.3363-3376, 2001.

(2008. 9. 30受付)