

交互砂州河川の生態系サービスポテンシャル 評価の試み

EVALUATION OF ECOSYSTEM SERVICE POTENTIAL IN SAND RIVER SEGMENT WITH ALTERNATE BARS

尾花まき子¹・安佛かおり²・辻本哲郎³

Makiko OBANA, Kaori ANBUTSU 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 名古屋市千種区不老町)

²博 (環境科学) 名古屋大学大学院工学研究科研究員 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³フェロー会員 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 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

River landscape is composed of various landscape units which provide spaces to support elementary processes in biophilic elements cycle as well as habitats for various organisms. It is important to preserve and restore each landscape, based on evaluation to show which part of sand bars is definitely significant. Particularly the former is related to ecosystem service which is focused on now a day. The space to support elementary process of biophilic elements cycle has potential for ecosystem service (ESP=ecosystem service potential), though it is not uniquely related to products of ecosystem service which is brought about through series of elementary processes when the flux passes through that space. So we clearly distinguished the ecosystem service potential from ecosystem service in this paper. However the spaces in river are dynamic, which sometimes promoted and declined. Under such dynamic situation, landscapes with higher ecosystem service potential should be preserved and/or restored. After such discussions, we have firstly prepared the map with mosaics of landscape units through GIS technique by using aerial photos with assistance of the topographical survey data and hydraulic calculation. And then, "weighted usable area" for ecosystem service potential of each landscape is calculated. Finally we have recognized its temporal and spatial variability in the segment, and with those information, we discuss and propose how to apply the ecosystem service potential for river management.

Key Words : River management, ecosystem service potential, evaluation, landscapes

1. はじめに

持続可能な国土管理が求められている今日、地球温暖化や人口増加に伴う化石燃料の大量消費など持続性を脅かすものが、地球環境や生態系の構造と機能をいかにに変化させてきたかを認識することとそれらの現状把握がますます重要である。特に、生態系の状態を計量する手法はエコロジカルフットプリント¹⁾や生態系サービス²⁾に挙げられるように、数々の試行錯誤を経て考案され、国土の持続性を測る指標として一定の効果を上げている。この指標を用いた地球規模での現状報告は、過去50年間で著しい生態系劣化を指摘し²⁾、その保全と回復に向けた目標の設定へと議論のステージを移行してきている。この

ようなさまざまな概念が持続性指標として認知されてきているなかで、具体的に国土を構成する森林、農地、都市、河川などの各景観での持続性確保が必須である。

以上のような背景を踏まえ、生態系にとってダイナミックな場である河川に着目すると、1997年の河川法改正以後、河川管理の目的として河川環境の整備と保全が認知されて久しく、河川環境の目標像の設定や評価に向けて種々の検討がなされてきた³⁾。しかしながら、いまだその整備目標が明確にされない一要因は、生態系としての環境を議論する難しさにあるといえる。そのような中、河川生態系保全に対する取り組みは全国各地に拡がりをみせると同時に、全国の河川での河川生態にかかわる調査研究の実施⁴⁾によって物理基盤情報や生物生息など種々の河川環境情報が蓄積された。

特に、「砂州景観の保全」を目標に掲げる砂河川ではそれらの環境情報を有効的に利用し、生態学的視点に基づいた指標を定義して、それを基に河川環境を評価する手法の開発が試みられている^{5), 6)}。

本論文では、「生態系サービスポテンシャル(ESP)」という概念を新たに提案し、交互砂州の景観保全指標としての統合的評価への有効性を示す。

2. 河川景観の構造と生態系サービスの関わり

(1) 生態系サービスポテンシャル (ESP)

河川景観は、様々なスケールの景観の構成による階層構造を有している。縦断勾配、河床材料などで規定されるセグメントの中には、交互砂州が形成されるような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。さらにその区間を絞り込み、砂州の表層被覆の違いを見てみると、植生域や裸地域、たまりやわんどなどさらに小さい空間スケールの「景観要素」から成り立っていることが分かる。本論文での景観とは、水循環、流砂系が直接規定する物理基盤、それによって支えられている生物相、物質循環を含む相互作用の結果形成されるもので、それをまさに生態系とみている。

上述した砂州上のさまざまな景観要素に着目すると、各々の特徴的な場においてそれぞれ特徴的な生態系機能が発揮されることが明らかにされている⁶⁾。生態系機能は物理基盤と生物相の相互作用の中で発揮されるもので、水・物質循環はまさにそれである。物質循環は、物理・化学的過程と生物学的過程に起因し、図-1では特に栄養塩・有機物循環に関わる河川で卓越する素過程を各々抽出している。一方、生態系サービス(ES)とは、この生態系機能のうち人々がその恩恵に属しているもの²⁾として定義されている。国連ミレニアム生態系評価の分類を参考にすると、気候・洪水・水質に影響する調整サービスや栄養塩循環・土壌形成などの基盤サービス、食料・水などの供給サービス、そしてレクリエーションなどの文化的サービスに分類されるが、ここでは河川において想定される生態系サービスを抽出し図示した。次に、水・物質循環の素過程が、いずれの生態系サービスに貢献するのかを整理すると、捕捉・濾過・脱窒・硝化など物質循環の大半の機能は、調整サービスのうちの特に水質浄化に集約されることが見てとれる。他方、有機物の流れは供給サービスに分類される。

砂州景観での生態系機能が発揮される機構を検討したところ、その場に潜在している特性(ポテンシャル型)と表面流や伏流がその場を通過することによって発現する役割(フラックス型)に大別できると考えた。すなわち砂州に散在する様々な景観が生態系サービスを生むポテンシャルを有していて、様々な条件下でのフラックスのパターンに依存してこれらが機能を発揮する。本論文

で、この前者を明確に切り出し、「生態系サービスポテンシャル」(ESP)と定義した。本研究では、砂州の伏流流動に大きく依存する水質浄化サービスに対象を絞り議論を進める。

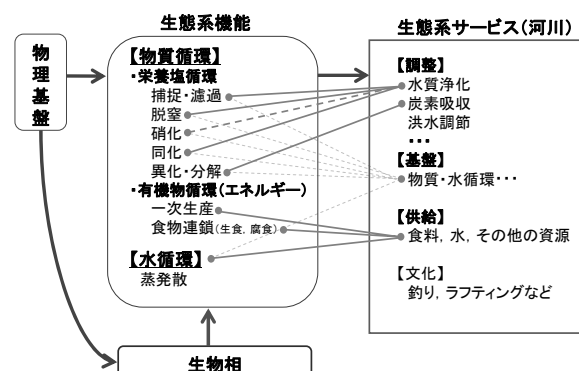


図-1 河川の生態系機能と生態系サービスとの関わり。

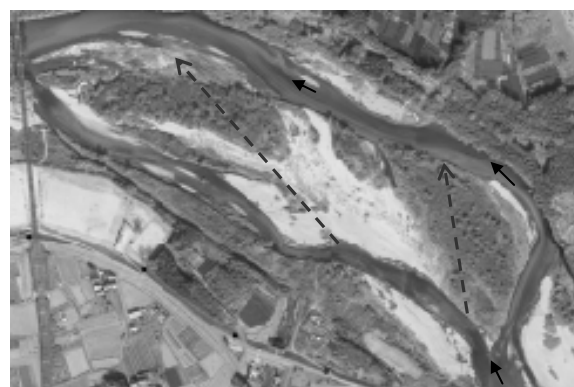


図-2 植生域と裸地域が交互に存在する砂州。

(実線：本流、点線：伏流経路、淀川水系木津川砂州を例示)

(2) 生態系機能の潜在性と発現機構

砂州上の景観要素は、表層被覆の違いや粒径などの物理基盤条件の特徴に応じて各々の生態系サービスポテンシャルを有する。すなわち、景観要素とESPは1対1に対応している。機能の発現は、様々な条件下でのフラックス流入がトリガーとなっており、物質循環の素過程である脱窒を例にとって詳述する。

脱窒とは、窒素化合物から分子状窒素を取り除く作用であり、脱窒能をもった微生物の存在と、河川水からの窒素化合物の供給が必要である。すなわち、この場合のESPは脱窒能をさし、フラックス供給に応じて発揮される生態系サービスが脱窒量である。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おり⁷⁾、特に砂州植生域でポテンシャルが高い。河川内砂州においてこうした生態系サービスポテンシャルの高いところは特徴付けられる場であるが、出水や人工的改変などにより変動が著しく、場の形成・消失が頻繁に生じる。また、こうした場の攪乱が砂州内のフラックス網を変貌させるので、同じ生態系サービスポテンシャルを有している場のどれ

がサービスを具体的に効率よく提供するかも変化する。

上流側と下流側が植生で覆われた砂州（図-2参照）を想定し、図-3に示すように砂州を単純化して考え、伏流経路にそって1次元的に砂州を見たものである。図のように、伏流経路に沿って植生域と裸地域が交互に存在している例である。ここで図の①は、元の状態の砂州、②は出水により植生域Aaがなくなった場合を想定し、各々のケースでの物質濃度の流程方向変化の概略をグラフに示している。元の状態の砂州の場合、まず植生Aに流入した物質は流程方向に沿って、式(1)のように景観のESPに応じて指数関数的に減少する。同時に、各景観要素での濃度変化 Δ すなわち脱窒相当量についても式(2)のように上流側景観が大部分を担う。

$$C(\xi) = C_{0j} e^{-k_i \xi} \quad (1)$$

$$\Delta(\xi) = \left| \frac{dC}{d\xi} \right| = C_{0j} k e^{-k_i x} \quad (2)$$

ここで、 C_{0j} はj番目の景観での濃度の初期値、 ξ はj番目の景観の入り口からの流下距離、 k_i がカテゴリーiの景観での単位距離あたりの濃度変化率で対象とする景観のESPである。例えばここでは脱窒能に相当する。よって植生域では大きな k_i の値を取り、裸地ではきわめて小さい。植生域A,Cでは同じ脱窒能(Potential)を有しているにも関わらず、脱窒量(Product)に差が現れているのはそれが流下物質の供給量（フラックス）の違いに起因していることが示唆される。

図の②では、消失した植生Aaに変わりAbの機能が発現している様子を示している。植生域での生態系サービスポテンシャルは同じであるため、変動にともなう水の流入が機能を発現させる一因となっており、植生Aaが消失してもAbがその機能を代替しているといえる。つまり、出水による攪乱が激しかったり、人工的な改変がある（砂州空間の利用）ことを考慮すると、砂州保全には、第一にESPの保全が重要であることがいえる。逆に言うと、機能発現の向上のためにフラックスを整備することも復元の手法となる。

一方、砂州に散在する景観要素は出水や降雨に規定され変化し更新され、また比高や粒径など場の条件の違いによって景観配置は砂州ごとにさまざまである。例えば脱窒が起こるプロセスを考慮すると、脱窒の発現する場である植生域の上流側での硝化作用の担い場となる好気的な裸地域の有無は、下流側植生域での脱窒量（ES）を増減させると推測できる。つまり図-4に概略的に示すようにポテンシャルを有する面積が同等な条件下で、プロセスの系統によるESの違いがある。このように、生態系サービスポテンシャルと生態系サービス発現量とが一致しないことへの十分な認識は必要である。一方、先ほど

述べたように、洪水攪乱や人為的改変にさらされている河川生態系にとっては、ポテンシャルを有している場こそ保全の対象であり、生態系サービスが発現している場所の保全にはその効果の確実性や持続性が伴わない。

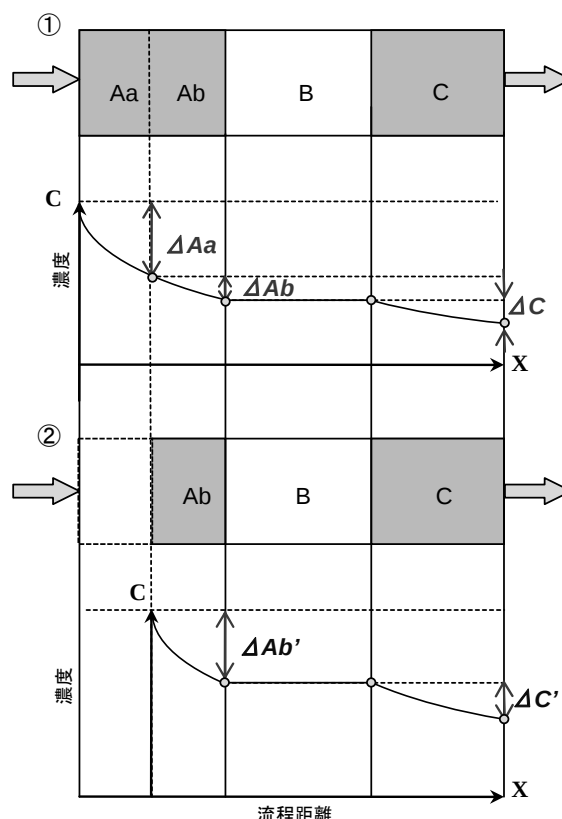


図-3 景観がもつ代替機能の概念（網掛け部：植生域、白抜部：裸地域、①：元の状態の砂州、②出水によって植生域Aaを消失した場合を想定）。

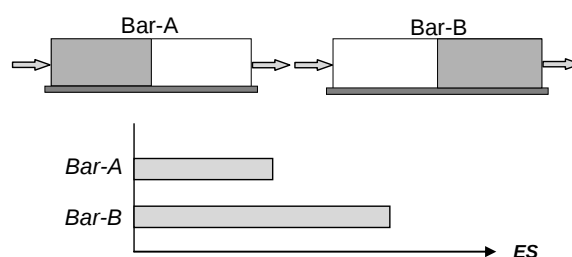


図-4 景観配置に起因するESの相違。

（網掛け部：植生域、白抜部：裸地域）

3. 生態系サービスポテンシャル評価

生態系サービスポテンシャル評価を行うにあたり、本研究で事例として扱う河川は、淀川水系木津川の淀川三川合流地点から約20kmの区間（図-5参照）で、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の砂州を有する交互砂州形成区間である。この区間では、これまでのフィールド研究によって、生息場適性に加えてさまざまな物質循環の素過程が明らかになっている⁴⁾。これにもとづき物質

循環の素過程の生起場を特定するとともにESPの評価を行った。生態系サービスとしては、砂州の水質浄化を取り上げる。

著者らは木津川砂州セグメントで、既に生息場適性についての議論を行い、WUA(weighted usable area)を指標にして、いくつかの代表種の生息適性の時空間変化を認識する手法とその計算例を示した⁶⁾が、ここでは生息場適性について提案されたWUAの議論を物質循環の素過程あるいはここで定義した生態系サービスポテンシャルに援用する。

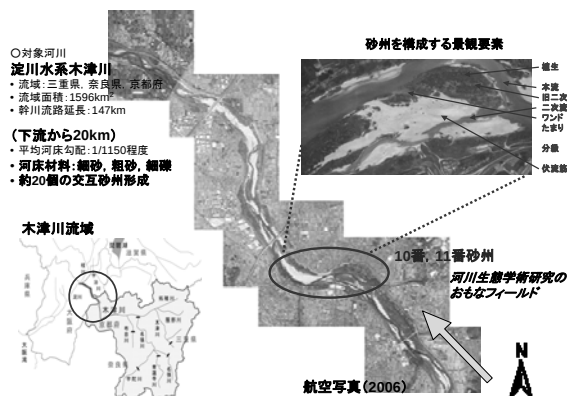


図-5 木津川の交互砂州形成区間。

(1) 交互砂州区間の景観特性

まず著者らがこれまでに提案した手法⁷⁾を用いて河川景観の分類を試みた。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、景観要素を図化した。解析に用いた流量条件としては、木津川の実際の流況に基づいて、特に景観要素の更新に影響を与えるとされる4パターン($Q=1700, 1000, 500, 100\text{m}^3/\text{s}$)を設定した。各々2~3年に1度程度の大洪水、年に1度程度の中洪水、年に3度程度の洪水および年に30回程度の小出水にあたる。なお平水時の流量は、 $20\text{ m}^3/\text{s}$ 程度である。

河川景観に用いた分類には、生態系機能が発揮される場である河道部分のみを抽出し、人工的な空間は排除した。さらに河道部分を、洪水規模別の冠水域に着目して細分類し、水位の低いものから順に、水際、低位、中位、高位冠水帯と名づけた。この景観分類に従い、過去6カ年分の河道内砂州の景観要素分類図を作成した。なお、区間内の5~15番砂州においては、2002年度の航空写真を用いて各砂州についての分類図を作成した。その結果、図-6と図-7に示すように、区間内砂州の空間分布特性と時間分布特性が把握できる。

結果を概観すると、図-6から区間内砂州の大きさの差異は最大で約5倍以上の差があること、特に植生域が卓越した大小さまざまな砂州が分布していることが分かる。一時水域であるたまりやわんどは、7番砂州をのぞいた全砂州に形成されている。景観の変遷に着目すると、こ

の区間では30年で全域的に2倍以上植生域が拡大していることが分かる。

また、同時に分類された景観要素は、比高や粒径、植物種などに代表されるように物理基盤の特性は異なっている。この物理基盤の特性が、生態系機能の発現に大きく影響するため、現地調査を実施し各景観要素の物理基盤情報を把握した。

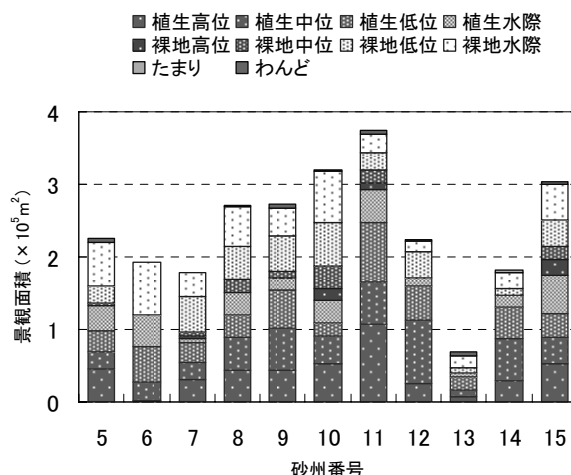


図-6 区間内砂州における景観要素の空間分布。

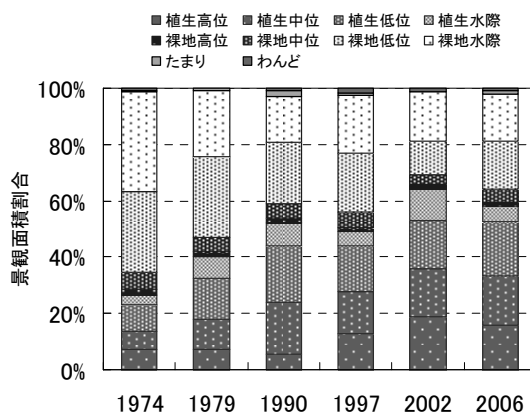


図-7 区間内砂州における景観要素の変遷。

(2) 生態系サービスポテンシャル

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、評価の対象とする生態系サービスポテンシャルとして「脱窒能」をとりあげる。

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⁸⁾。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⁹⁾。つまり、景観分類図の水際~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¹⁰⁾。また、水際から高位冠水帯

の間でも脱室能に差異がある可能性が考えられる。砂州上の植生域の脱室は、おもに有機物が豊富な表層土壌で起きるとされている¹¹⁾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、脱室能を有する場として水際～高位冠水帯植生域をまとめて取り上げる。

(3) 生態系サービスポテンシャルの時空間分布特性

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、ESPがある場を特定したことによって、景観とESPの関連が明らかになったため、それらをかけ合わせて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_i 、各景観要素の生態系サービスポテンシャルを γ_i (0～1) とするとき、各砂州のESPは、次式で定義されるWUAで定量化される。

$$WUA = \sum_i A_i \gamma_i \quad (3)$$

これは生息場評価におけるPHABSIM(Physical Habitat Simulation)¹²⁾の援用である。ここでの γ は、0か1かの値を用いている。各砂州が有するESPの分布を図-8に示した。さらに、区間内砂州における過去6ヵ年のESPの変遷を図-9に示した。各々の結果について、以下に考察する。

a) 区間内砂州におけるESPの分布

評価対象年として、2002年を選定した。WUAは面積の大きさと相関関係を有するため、区間内の砂州において、面積が最も大きく植生が占める割合の高い11番砂州のESPが、突出していることが分かる。木津川の対象区間では、いずれの砂州も生態系サービスポテンシャルを有していることが確認できる。また、各砂州での植生を占める割合が平均的に6割を超えており、植生繁茂が著しい区間であることが推定できる。

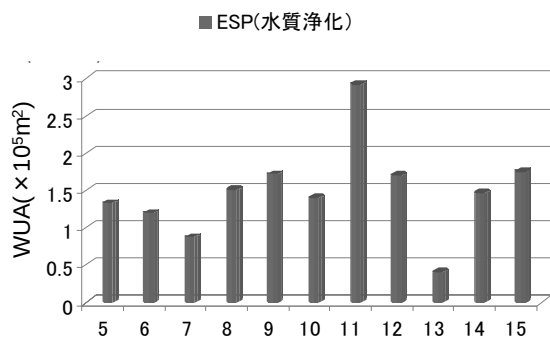


図-8 区間内砂州におけるESPの空間分布(2002年)。

b) 区間内砂州におけるESPの経年変化

過去30年間の生態系サービスポテンシャルの経年変

化を、代表6ヵ年を選定して図-9に示した。木津川の対象区間では、過去30年間で全域的に2倍以上植生域が拡大し、それに伴いESPも増加していることがみてとれる。航空写真と横断測量結果をあわせて検討したところ、特に高水敷寄りからの植生の拡大が目立っている。また、2002年を境に植生が激減していることが確認できるが、これは2000年前後に年平均最大流量を越える出水が発生したため、それによる河床高の変化にともなう砂州地形変化に起因するものと推察できる。

図-10では、生態系サービスポテンシャルがどの場で存在するのかを具体的に図示した。ここでは、木津川砂州の研究代表砂州である10番、11番砂州を例示したが区間内の全砂州においてこのように図示することがGISを手法に取り入れることによって可能となった。

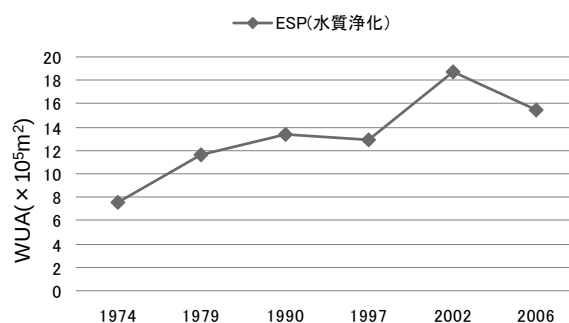


図-9 区間内砂州におけるESPの経年変化。

4. おわりに

本論文では、持続性につながる生態系サービスポテンシャルを河川環境の評価指標に選定し、それが砂州上のどの場で卓越しているのかを示すために、構築した評価枠組みを用いて、そのシナリオに沿っての定量評価を試みた。

生態系機能と生態系サービスの違いを明確にするとともに、生態系サービスがポテンシャル的側面とフラックス側面とからなるとして前者を生態系サービスポテンシャル(ESP)として概念化することで、その定量化への道筋が示せた。また生態系サービスポテンシャル評価が動的な砂州の景観保全に有力な指標であることを示した一方、生態系サービスポテンシャルの低下した砂州でフラックス再生によって生態系の回復が可能であることも示唆できた。ESPについてのWUAを定義して砂州ごとのポテンシャル評価を可能にするとともに、過去の航空写真や横断測量データからWUAの変遷を求め、区間での生態的視点での質の変化を定量化できたといえる。

次の課題として、河川環境評価の視点では、定量化できたものの良し悪しをどのように判断するかが問題となる。河川での水質浄化を例にとって本論文では議論を進め、ESを脱室量・ESPを脱室能と定義した。例えば脱室量の増加は河川のESの増加としては良いことである半面、流域からの負荷(供給量)が増加したことによって脱室

量が増えたということも考えられる。河川が浄化能を有することは大事ではあるが、河川については流域にとって負荷増大は解決すべき課題でもあるため、量のみでの議論ではなく、今回の着眼のように脱窒能（ESP）の把握がまず重要なのではないだろうか。

今後は、砂州内での景観の配列やフラックスを考慮した場合での砂州内で生起する現象の応答の解明などに取り組みたい。

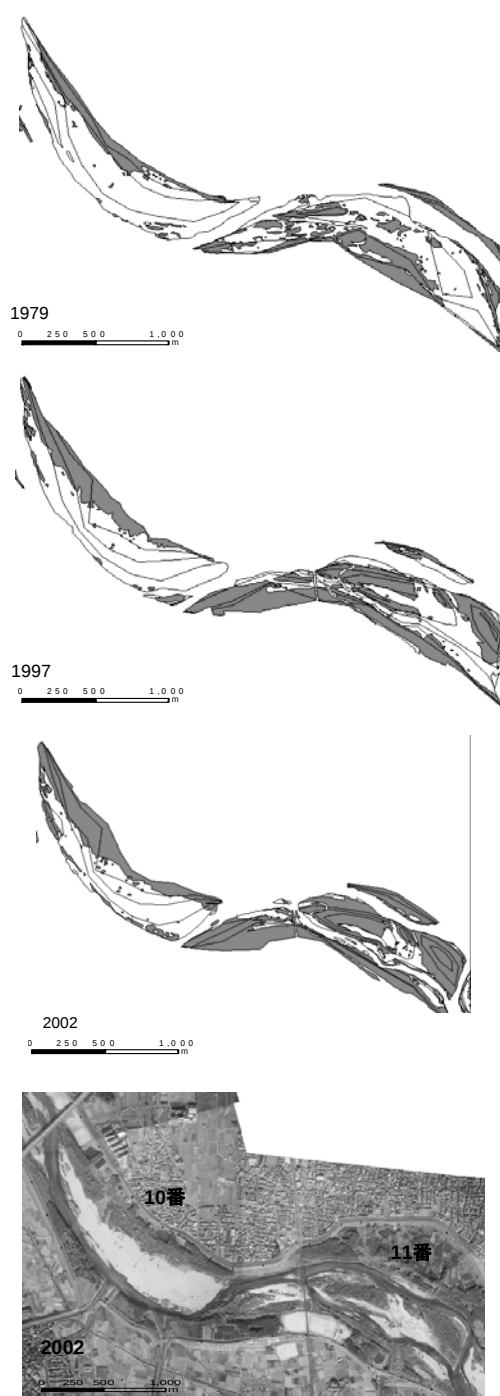


図-10 区間内砂州(10, 11番砂州)におけるESPの空間分布と変遷。
(黒部分がESPを有している場、航空写真2002年度)

謝辞：本研究は河川生態学術研究会（木津川研究グループ）の一部として実施した。また、文部科学省科学技術振興調整費による「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究の一部を受け持つものでもある。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Rees, William E.: Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out, *Environment and Urbanization* 4, pp.121-130, 1992.
- 2) Millennium Ecosystem Assessment : 国連ミレニアムエコシステム評価-生態系サービスと人類の将来-, 横浜国立大学21世紀COE翻訳委員会, オーム社, 2007.
- 3) 中村太士・辻本哲郎・天野邦彦: 川の環境目標を考える～川の健康診断～, 技報堂出版, 2008.
- 4) 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.
- 5) 尾花まき子, 辻本哲郎: 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-, 水工学論文集, 第53巻, pp.1183-1188, 2009.
- 6) 辻本哲郎, 尾花まき子, 井上佳菜: 砂州景観の生態的機能評価から見た河川環境管理の目標設定, *河川技術論文集*, Vol.15, pp.13-18, 2009.
- 7) 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.
- 8) 片貝武史, 亀井丈志, 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*, Vol. 12, pp.489-494, 2006.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) アメリカ合衆国内務省・国立生物研究所（テリーワドゥル・中村俊六訳）: IFIM入門, 財団法人リバーフロント整備センター, 1999.

(2010. 4. 8受付)