

流域圏環境管理における  
河川生態系の保全戦略策定のための基礎的研究

平成 23 年 3 月

尾花 まき子



# 目次

## 第1章 序論

第1.1節 研究の背景	1
1.1.1. 流域圏管理とその研究に関するこれまでの動向	1
1.1.2. 流域圏管理に向けた河川生態系保全に関する従来の取り組み	4
第1.2節 研究の目的	5
第1.3節 本論文の構成と概要	5

## 第2章 流域圏環境管理におけるアセスメント技術とその役割

第2.1節 概説	9
第2.2節 環境の変質とアセスメントの進化	9
2.2.1. 環境の変質と環境評価システム	9
2.2.2. 環境アセスメントに関わる法制度	10
2.2.3. 環境評価手法としてのシナリオ分析の必要性	11
2.2.4. まとめ	12
第2.3節 流域圏環境管理技術開発	12
2.3.1. 基本コンセプト	13
2.3.2. 流域圏環境アセスメント技術の構築	16
2.3.3. 流域圏アセスメント技術を用いたシナリオ評価への展開	21
第2.4節 結語	23

## 第3章 流域圏における河川景観とその管理へのアプローチ

第3.1節 概説	27
第3.2節 河川景観と河川生態系の構造と機能	27
3.2.1. 河川景観のスケール階層性・連結性	27
3.2.2. 河川生態系の構造と機能	29
3.2.3. 河川の生態系機能と生態系サービスの関わり	30
3.2.4. 生態系機能のポテンシャル型特性とフラックス型特性	31
第3.3節 既往の生態系機能評価手法と課題	34
第3.4節 砂州景観の評価枠組みの構築	35
第3.5節 結語	37

## 第4章 河川景観解析手法を用いた生態系機能ポテンシャル評価

第4.1節 概説	41
第4.2節 研究対象地の概要	42
第4.3節 研究対象地における河川生態学術研究	43
第4.4節 冠水頻度解析による物理基盤特性の把握	45
4.4.1. 手法	46
4.4.2. 結果	53
第4.5節 景観解析手法による景観分類	54
4.5.1. 手法	54
4.5.2. 結果	56
4.5.3. まとめ	57
第4.6節 砂州の生態的機能ポテンシャル評価	57
4.6.1. 手法	58
4.6.2. 指標の設定	58
4.6.3. 結果と考察	62
第4.7節 結語	64

## 第5章 砂河川砂州の伏流流動による水質フラックス制御機能の評価

第5.1節 概説	69
第5.2節 研究対象地の概要	70
5.2.1. 砂州景観分類	71
第5.3節 砂州の物理基盤特性と伏流水質特性	72
5.3.1. 現地観測の概要	73
5.3.2. 物理基盤特性の把握	74
5.3.3. 伏流水観測	79
5.3.4. まとめ	82
第5.4節 伏流水・物質輸送解析	82
5.4.1. 数値解析モデルの概要	82
5.4.2. 再現計算	84
第5.5節 河川水濃度および土壌環境条件を考慮した水質浄化機能評価	88
5.5.1. 計算条件	88
5.5.2. 計算結果と考察	88
第5.6節 砂州植生分布形状を考慮した水質浄化機能評価	90
5.6.1. 計算条件	90
5.6.2. 計算結果と考察	91

第 5.7 節 結語 .....	93
<b>第 6 章 結論</b>	
第 6.1 節 各章の研究成果 .....	97
第 6.2 節 砂州景観の生態系保全戦略へ向けて .....	98
第 6.3 節 今後の課題 .....	99
謝辞 .....	101



# 第1章 序論

## 第1.1節 研究の背景

我が国では、河川を軸とした自然の水循環に伴って形成された国土を基盤として、河川に沿って都市が成立し、産業・経済活動の発展とともに瞬く間に都市は拡大した。人間活動は、その都市を含む流域圏における水・物質循環系や生態系など自然のシステムに依存し、これら自然システムから多大な恩恵を受けてきたといえる。しかし20世紀に生じた急激な都市化、高度経済成長、大量消費型等へのライフスタイルの変容は、水・物質循環系や生態系に対して多大なインパクトを与え、自然のシステムが自律的に機能していた流域圏自然基盤の脆弱化を招いた結果、河川や湖沼等の水環境の悪化、生物多様性の喪失、地球温暖化など様々な環境問題が生じるに至っている。このような問題を根本的に解決し、持続可能な社会を構築するためには、流域圏という視点から水・物質循環系の自然システムを再生し、人間が自然の恩恵を享受できる自然と共生した国土を形成する必要がある。

流域圏は、河川の流れによる土砂の運搬・堆積作用から作り出された水成地形が基盤となっており、河川の流呈に沿って国土の成り立ちも姿を変える。環境の劣化とともに認識されてきた自然環境・生態系の保全においては、特に国土の中で水・物質循環の駆動力となり、上下流の連続性と他空間への横断的連結性をも支配する河川への着目は欠かせない。

以上のような背景から、本章では「流域圏」に着目し、生態系管理といった新しい軸を基にした方向を念頭に、これまでの流域圏管理や研究の変遷を振り返る。そして、流域圏管理の中で、生態系保全における重要空間としての河川に着目し、河川生態系の保全に関する従来の研究や取組の発展を整理する。それらを受けて、本論文で流域圏というシステムの階層性を意識し、その動的要素としての河川生態系管理に向けた研究を行い、生態系保全戦略策定の基礎に位置づける流れを説明する。

### 1.1.1. 流域圏管理とその研究に関するこれまでの動向

#### (1) 国土計画と流域圏

「流域圏」という概念が国土計画・管理において初出し認識され始めたのは、1977年に策定された第三次全国総合開発計画（三全総）が打ち出した「田園都市・定住圏構想」においてである。この定住圏構想は、水系への着目に重きが置かれたため流域圏の問題が熱心に議論され、高度成長による乱開発への歯止めを期待して、流域圏を単位とした生活圏域を形成していくと

いう方向性が大きく支持された。しかし、生活と環境との調和を掲げた定住圏構想を前面に押し出す一方、効率・成長志向の二全総の流れをひきずらざるを得ず、結果的に「流域圏」構想は縮小の一途をたどることとなった。再び国土計画の中で流域圏が取り上げられたのは、1998年策定の第五次全国総合開発計画（五全総）「国土のグランドデザイン」の中である。高度経済成長による公害被害の防止と改善が掲げられる中であって、自然環境が経済や公平と並ぶ価値として認識する考え方が強まり、経済と環境、社会の調和を目指してそれを確保する場としての流域圏が定義されている。ここでは、流域圏を「流域および関連する水利用地域や氾濫原」で示される一定の範囲の地域（圏域）と定義し、水質保全、治山、治水対策、土砂管理や森林・農用地等の管理など地域が共同して取り組む際の枠組みとして形成される圏域ともされている。また、21世紀における国土の持続的な利用と健全な水循環系の回復を可能とするため、流域圏の歴史的な風土性を認識し、河川、森林、農用地等の国土管理上の各々の役割に留意した総合的な国土管理の必要性を説いている（国土交通省国土計画局、1998）。このように、国土計画の中で流域圏に着目した総合的な国土管理の必要性が訴えられるなかで、流域圏の基盤となる水・物質循環系の解明に向けた研究開発に力点が置かれることになってきている。

## (2) 「自然共生型流域圏」研究の変遷

「自然共生型流域圏」は、内閣府総合科学技術会議による第2期科学技術基本計画（2001～2005年）の重点分野・環境の「自然共生型流域圏・都市再生技術研究」イニシャティブとして研究の遂行が決定された。イニシャティブの目標は、①流域圏・都市再生技術・システムを体系的に整理、②自然共生型都市を実現するためのシナリオを設計・提示することとし（「自然と共生した流域圏・都市の再生」ワークショップ実行委員会、2005）、流域圏全体の生態系機能が都市を支えるという基本的視点から、山地～農地～河川～湿地～都市～沿岸域固有の生態系機能及び生活空間の保全・修復・再生技術の確立をはかることとされている。これは極めて広域的な課題であり、流域圏全体での相互連関が必要であるため、分野横断的な研究の試みの初めての舞台として、湾域環境の再生を目的とした東京湾再生シナリオが注目された（総合科学技術会議、2005）。そこでは、水・物質循環のモデル化を基盤とした流域圏評価技術・システムの開発を受けて、東京湾だけでなく他流域（霞ヶ浦、琵琶湖・淀川等）への適用も展開され、自然共生、先端技術開発、循環型社会構築などのシナリオ比較が行われている。特に自然共生型流域圏のシナリオの視点では、生息場評価などの知見も蓄積されることとなった。

このようなイニシャティブの流れを受けて、西日本では大阪湾再生へ注目が集まり、淀川流域圏プロジェクト（2002～2006年）が実施された（加賀、2006）。そこでは、土地利用や森林管理シナリオを幾通りかに変化させて、それによる地域特性を考慮した温暖化対策を提案できるプラットフォームが開発された。また、各自治体や一般市民が簡便にアクセス可能な機能も備えられている。ここでは、流域環境については網羅的な情報収集が行われているが、流域圏管理において必要となる生態系機能の相互関係や連結性の取り扱い、個別要素で開発された指



標の流域圏統合化などがなお課題として残されている。東京湾、大阪湾ともに自然共生型流域圏構築を実現するための方策として、同じ時期に組織された湾再生推進会議と連携、湾の環境改善に向け、陸域からの負荷削減を目標とした流域圏管理が実施された。特に、大阪湾での取り組みでは、流域圏評価技術の関係自治体や住民などステークホルダーへの情報開示システムは構築されたが、そのフィードバックシステムの不備が指摘されており（加賀，2006）、多方面にわたる研究技術開発と実際の管理上における情報とそれらの理解との間には乖離が見られる。また、海外を対象とした流域圏研究も展開されており、東アジアの流域圏における生態系機能の総合的な観測による実態把握に基づいて、水の循環過程における量と質の問題に焦点を当て、生態系機能のモデル化と予測手法の開発が進められた（国立環境研究所，2006）。

第3期総合科学技術基本計画（2006～2010年）では、これらの研究は、「地球規模水循環変動研究」に統合され、「水・物質循環と流域圏研究領域」として改組された。これによって、総合研究として継続されるものの、「自然共生型流域圏」のイニシアティブ的特性は薄れたといわれてよい。しかし、第2期の成果を受けて伊勢湾においても、2006年3月に伊勢湾再生推進会議が発足し、伊勢湾再生を軸とした自然共生型流域圏構築の検討がスタートした。同時に、2006年度文部科学省科学技術振興調整費重点課題として「持続可能な流域圏管理技術の開発」が始まり、伊勢湾流域圏を対象に、大学といくつかの国土管理所掌官庁系の国立研究所が連携した研究チームにより現在研究が進められている（「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」（2006～2010年度）、辻本ら，2007）。

### (3) まとめ

以上のように、今や「流域圏」における環境管理は、国家的課題となっているため、流域圏を総合体とみなした国土管理や取組みにおける計画レベルでの素地は整いつつある。そのような国家的認識に応じて、流域圏の自然環境・生態系保全に関する研究技術開発も急務となっており、特に水・物質循環を基盤とした流域圏評価システムや観測に基づいた生態系機能評価・予測技術開発が精力的に進められている。しかし、「流域圏」は、国土を形成する様々な空間領域（山地、農地、河川、湿地、都市、沿岸域など）を扱うため、計画レベルでの階層の異なりやそれに関わる各主体団体間の調整など複雑な問題も多数介在している。研究開発に限ってみても、流域圏統合モデルは提案されるものの、流域圏を構成する個別空間（地域）での取り組みの指標化やその連結性、それに実際に取り組む自治体や一般市民などステークホルダーへの情報開示などが不十分であり、こうした事も明らかになっている。すなわち、空間的階層性を意識した論理体系の構築や連携体制は依然として課題となっている。

### 1.1.2. 流域圏管理に向けた河川生態系保全に関する従来の取り組み

流域圏における河川の役割は言うまでもなく、その環境管理において河川生態系が果たす役割の評価や管理に関する研究は必要不可欠であると考えられる。日本における河川は変動が著しく、流域での人々の安全・安心を確保するための治水技術の発展とともに、生活環境の豊かさを求めた水・河川空間の利用など、昔から人間と河川は共生してきた。しかし、前節で述べた高度成長に伴う人間活動の稠密化は、ダム建設や横断工作物の設置、河川改修など生活環境の安全性・利便性を追求しすぎた結果、それは河川との共生関係のバランスを崩すばかりか、水質汚染や水産資源の枯渇、海域への汚濁負荷の増大などに見られる負の遺産として様々な問題を引き起こしている。

このような背景の中、河川環境の保全への意識が高まり、国土交通省河川局は1997年に河川法を改正し、「河川環境の整備と保全」を法の中に位置付けた。同年、環境影響評価法が公布され、生態系保全の必要性がアセスメントの中に配慮された。また、1990年に通達が出された「多自然型川づくり」の推進について（建設省、1990）から2006年には「多自然川づくり」の基本方針が策定され、河川における自然環境の保全がすべての川づくりの基本となった。このように、河川環境・生態系保全が河川管理において制度化されていく中、さまざまな時空間スケールで特徴づけられる要素の相互作用により成り立つ河川環境や河川生態系を、それらの構造と機能に基づいて適切に把握したうえで、それらを評価する手法の確立は、最重要課題である。

一方、そのような環境の変遷に応じた河川環境保全施策の枠組みが整備される中、河川生態系の研究に対する取り組みにも変化の兆しが見え始める。生態系（Ecosystem）は、さまざまな空間で独自のものが醸成されると考えられ（Tarnsley,1935）、さまざまなフィールドでの個別研究が中心であったが、河川生態系の構造と機能が河川環境に与える影響を明らかにするためには、河川生態学術研究など工学や生態学との学際連携の中で、生態系の普遍構造やそれらの統合化も議論されるようになってきた。1997年には生態学や河川工学などの研究者からなる「河川生態学術研究会」（国土交通省河川局、1997）が組織され、標津川、岩木川、千曲川、多摩川、木津川、北川という6つの特徴的な景観を持つ河川を対象として共同研究が展開されている（2010年現在）。生態学的な観点より河川を理解し、川のあるべき姿を探ることを目的として精力的に研究が進められ、河川流域・河川構造の歴史的な変化に対する河川の応答や生息場の形成維持機構、生物現存量や種組成、物質循環やエネルギーの流れなど河川の物理基盤、生物群集、物質循環的な側面から、そのメカニズムを捉える研究成果は数多く蓄積されたといえる。しかし、河川生態系の構造と機能を支える個別的な研究知見は蓄積されているものの、それらを統合的に位置づけた上での生態系を評価するための手法の構築は十分ではなく（中村、2004）、河川環境管理の中で河川生態系保全が求められている今日にあって、その課題解決は急務となっており、同時にそれらを流域圏管理に向けて適切に取り込んでいかなければならない。

## 第 1.2 節 研究の目的

流域圏は、持続可能な国土を形成していく上での最適管理単位である一方、水・物質循環網により連結された様々な空間領域を取り扱うため、流域圏を一体として見た時のトップダウン型の統合的管理とボトムアップ型の個別空間（地域）的・個別生態系的管理では取組みに依然として乖離が見られるように複雑な問題が存在する。それは流域圏を構成する各景観（スケールを持つ特徴的空間）に着目して考えた場合でも同様のことが言え、その中でも特に国土を縦断する河川では水配分や洪水制御をめぐる上下流問題など、国民の生活に直結する問題はなお深刻なままといえる。そのような中で、持続性確保に向けて自然環境・生態系保全は必須事項との認識は高まり、流域圏に住む様々な人々の協力が必要とされる中、その調整を支援する科学的な流域圏アセスメント技術開発が望まれている。それには、流域圏を構成する各景観の階層性と連結性を認識し、総合的な視点の中に各個別景観の役割を反映し可視化できるような配慮が必要である。

そこで本研究は、自然共生型シナリオ下での流域圏管理において、特に河川砂州景観に着目し、それを構成する各景観要素の役割を認識した上で、それらの総合化へ向けた評価手法につなげようとするものである。

具体的に言うと、流域圏における自然共生型シナリオを想定した環境管理の視点で、特に河川の交互砂州形成区間を対象として、河川生態系保全に向けた砂州景観評価手法の構築を行い、保全戦略策定へ向けた道筋を検討する。

## 第 1.3 節 本論文の構成と概要

本論文は、全 6 章より構成される。

本章では、「流域圏」における管理や研究の変遷をもとに、科学的認識を基盤とした流域圏環境管理の枠組を明確にした。その中で、生態系保全における重要空間としての河川に着目し、動的要素としての河川生態系の保全に関する従来の研究や取組の発展を整理した。その中から課題を明らかにした上で、本論文の方向性と目的を述べ、以下にその構成を明らかにしている。

第 2 章では、まず環境の変質とともに進化してきたアセスメントの仕組みを概観した後、流域圏環境管理技術の中で必要となる概念の整理を行い、その概念に基づいて構築した流域圏アセスメント技術体系を紹介する。

第 3 章では、流域圏の重要な構成要素である「河川」に着目する。特に、砂床河川の交互砂州を有するセグメントを対象に、河川生態系を評価する上で重要となる「河川景観」や「河川生態系の構造と機能」、「生態系サービス」などの基本概念を、既往文献を踏まえながら整理を行ったうえで、本研究におけるそれらの捉え方を論じる。さらに、それらの概念に基づいて、砂河川交互砂州形成区間での河川生態系管理に対する景観からのアプローチの有効性を示す。

第 4,5 章では、前章で構築した砂州景観の評価枠組みに基づき、それを構成する要素技術を組み合わせた評価手法を開発する。すなわち、第 4 章では、評価枠組みの基盤となる河川景観解析手法を提案した上で、河川環境を評価するための指標となる「生態的機能」を抽出し、対象河道区間でのそれらが有する時空間分布特性を評価し、それらの役割を明らかにする。第 5 章では、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を取り上げる。その発現機構がフラックスに応じて異なることに着眼し、伏流流動に伴う砂州の水質浄化機能を、現地観測、室内実験および数値解析を援用して定量化することを試みる。さらに、構築したモデルを用いて、砂州の土壌条件や植生の分布形状の違いが水質浄化機能に与える影響も検討する。

第 6 章では、前章までで得られた成果の総括を行うとともに、今後取り組むべき課題について述べる。

以上のような本論文の構成と概要を図-1.1 に示す。

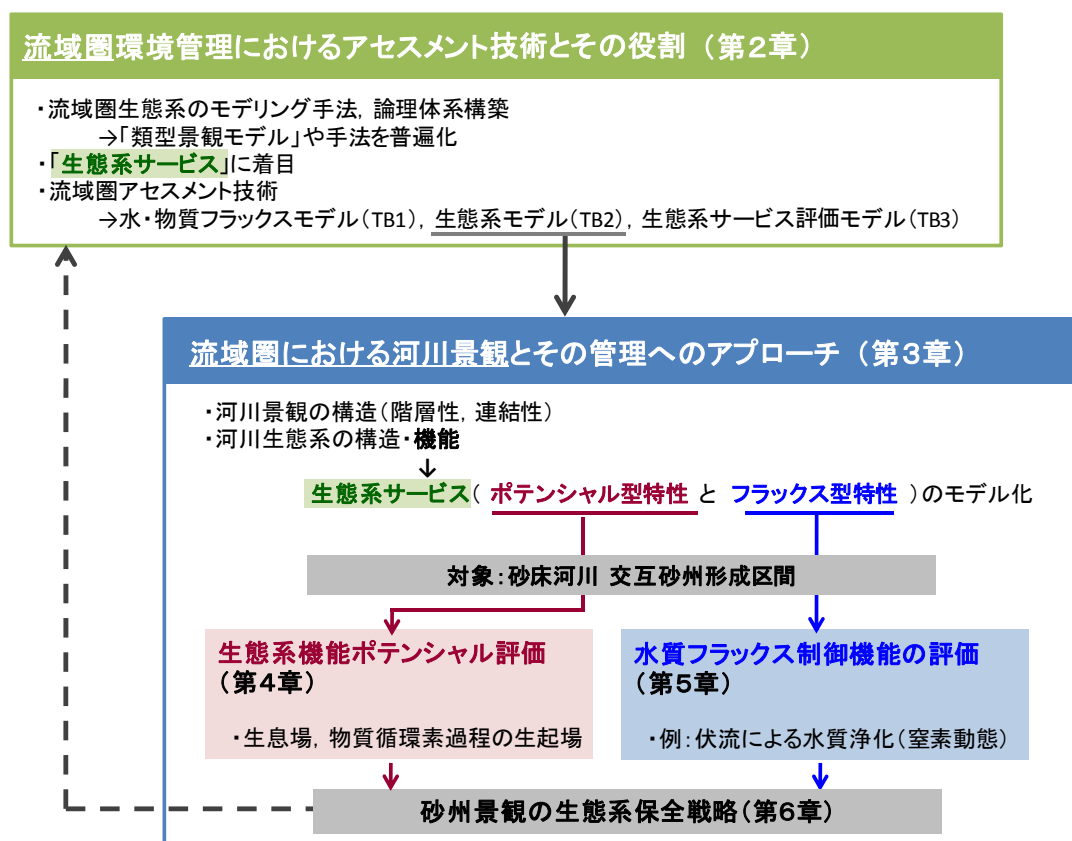


図-1.1 本論文の構成と各章の対応

## 参考文献

- 加賀昭和：環境技術開発等推進事業「流域圏自然環境の多元的機能の劣化診断手法と健全性回復施策の効果評価のための統合モデルの評価」成果報告書，pp.287，2007.
- 建設省：「多自然型川づくり」の推進について，1990
- 国土交通省国土計画局：全国総合開発計画「21世紀の国土のグランドデザイン-地域の自立の促進と美しい国土の創造-」，1998.
- 国土交通省河川局：川の自然環境の解明に向けて-河川生態学術研究の概要-，2006.
- 独立行政法人国立環境研究所：東アジアの流域圏における生態系機能のモデル化と持続可能な環境管理プロジェクト，国立環境研究所特別研究報告，pp.93，2006
- 総合科学技術会議：自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシャティブ報告書，2005.
- 「自然と共生した流域圏・都市の再生」ワークショップ実行委員会編著：自然と共生した流域圏・都市の再生，山海堂，pp.307，2005.
- 辻本哲郎，戸田祐嗣，尾花まき子：「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクトのねらい，河川技術論文集，Vol.13，pp.291-296，2007.
- 中村太士：自然再生-地域（Region），流域（catchment），地区（Local site）における分析と復元の考え方，日本緑化工学会誌，30（2），pp.391-393，2004.
- 中村太士，辻本哲郎，天野邦彦：川の環境目標を考える～川健康診断～，技報堂出版，pp.122，2008.
- Tarnsley, A.G.: The use and abuse of vegetational concepts and terms, Ecology, 16, pp.284-307, 1935.



## 第2章 流域圏環境管理におけるアセスメント技術とその役割

### 第2.1節 概説

持続可能な国土管理が求められている今日、流域圏を管理単位とした場合の最重要課題は、水循環により駆動される物質（有機物、栄養塩類、土砂）が水系を通じて沿岸域・湾域へと供給されるシステムの健全性を考慮した管理である。拡大型社会経済シナリオがもたらした地球規模環境変化の反省として、また縮小型社会経済シナリオが強いられる状況で、「持続的発展」が標語となり、自然と共生した国土管理はそのひとつのシナリオとして注目されている。特に、流域圏環境管理においては、流域圏の健全性を測るための指標と生態系や人間活動の影響を含めて流域圏環境を適切に評価するための手法の開発が必須である。

例えば、文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクト（2006～2010年度）の中では、「生態系サービス」によって流域圏の持続性を測る評価手法の開発に努力が注がれてきた（辻本ら、2007・2008・2009・2010）。

本章ではそれらの研究の成果について、まず環境の変質とともに進化してきたアセスメントの仕組みを概観した後、流域圏環境管理技術の中で必要となる概念の整理を行い、その概念に基づいて構築した流域圏アセスメント技術体系について述べる。

### 第2.2節 環境の変質とアセスメントの進化

#### 2.2.1. 環境の変質と環境評価システム

都市を中心に発展した産業や経済・社会活動は、人間生活を豊かにし快適にする一方で、自然環境に多大な負荷をかけ、今日の地球環境問題に至るまでの著しい環境劣化をもたらしてきた。生物の多様性や資源の減少などの速度と規模が、許容の限界を超えつつあるとの警鐘が発せられて久しい（UNCED,1992）中、持続可能な社会を実現するうえで温暖化防止や資源の循環利用の促進、自然共生に向けた活動へと人々を取り巻く社会経済環境を誘導・制御する施策を設計し、その実現の駆動力となる技術の確立は極めて重要である。

そのような人々を取り巻く自然環境を定量的に評価する試みは、高度成長期の経済・産業発展にともなう大気汚染や水質汚濁などの公害被害を速やかに改善することが国家の課題であった時期の実状把握に端を発する。内藤ら（1995）は、1950年代から現代までにおける環境問題の変遷を4期に分類し、各々の時期での環境評価システムの果たしてきた役割を整理している。

高度成長の1950年代から70年代にかけて公害の発生が深刻になった第1期は、工業化とそれに伴う都市化や、自動車交通の増加にともなう環境劣化が社会問題となった。この時期には個人の安全・安心な生活環境の確保とそのための汚染源の規制に重きが置かれ、その規制の根拠となる閾値的な環境指標として「環境基準」が定められた。70年代後半から80年代の第2期では、第1期での公害の防止効果が現れるとともに2度のオイルショックを経て、より快適で便利な生活快適性の改善が課題となった。人々の基本的な居住条件の改善のため、生活環境に関するシビルミニマム指標を用いた現状評価がなされ、その水準が測られた。80年代後半以降の第3期では、一律的な環境改善のみならず地域の歴史や状況などの地域特性を活かした環境整備がはかられ、この頃から身近な（地域）自然環境保全が課題となり、その現状把握のために住民の満足度などが指標として地域環境評価の中に取り入れられた。90年代以降は、地域から地球環境へスケールが拡大し、それへの関心が高まるとともに、地球環境保全、生物種保全、環境の再生など現状の改善だけでなく、将来世代への配慮も含めた持続可能な社会の実現が広く認識されるとともに、生態系の存在への考慮も注目されるようになった。21世紀に入り、地球温暖化防止にともなう低炭素化への制約、化石燃料・資源枯渇や自然資本の減少、次世代に継承する自然共生社会への転換など問題が多様化し、かつ複層化してきている。そのため、環境評価指標の特性としては持続可能性指標や環境資源の経済価値化などが挙げられ、複雑化した環境問題を、地域や地球環境といったスケールの違いを考慮しながら取り扱うことのできる評価体系の構築が求められている。

### 2.2.2. 環境アセスメントに関わる法制度

環境アセスメントとは、事業や計画の実行による環境影響を、調査に基づいて事前に予測・評価し、この結果を勘案して、環境保全への配慮・方策に反映させるシステムのことである（浅野，2009）。上述したような環境の変質にともなう環境評価体系の進化は、事業実施に対する環境への配慮が制度化されたことによるところが大きい。

日本では、1984年に閣議決定された「環境影響評価の実施について」による環境アセスメント（閣議アセス）は、社会・経済活動の発展にともなう環境汚染と公害の未然防止への期待が大きく、主に国レベルの大規模事業を対象に、その網羅的な実施が決定された。これに対して、1997年に制定された「環境影響評価法」では、評価の前段階（スクリーニング・スコーピング）がプロセス化され、公害防止の観点から自然環境保全、生物の多様性や自然とのふれあいの評価に重点がおかれ、事業所掌官庁のガイドラインにより手法の具体化が進められた。いわゆる法アセスといわれている。この法アセスは、個別事業の実施段階で進められる事業アセス（EIA：Environmental Impact Assessment）にとどまっているため、環境影響の回避・低減・代償の検討の幅が狭いことや複数事業の複合的な影響などを検討する機会を失うことが懸念され、2007年に「戦略的環境アセスメント導入ガイドライン」がとりまとめられた。これによる戦略的環境アセスメント（SEA：Strategic Environment Assessment）の導入は、個別事業が位置づけ



られる一段階前（事業の位置や規模等の検討段階）での検討を可能にしたことから、不確実性への対応、代替案や環境保全措置などの各方面において事業段階より幅広い側面における検討ができるようになったこと、また議論の透明性や衡平性の確保のためにパブリックインvolvメント（Public Involvement）の手続きを包含したことが特徴である。そのため SEA では、上述した 21 世紀での課題である持続可能な社会に向けて重要となってくる持続性の視点からの環境評価への展開も期待できる。

さらに、国土交通省（2009）では 2008 年に作成した「公共事業の構想段階における計画策定プロセスガイドライン」のなかで、SEA を内包した事業計画策定プロセスの提案を行っており、さらなる計画の上段でのアセス導入が期待され、これが複数事業を含む総合的な計画策定手法そのものになっていくことが想定される。

### 2.2.3. 環境評価手法としてのシナリオ分析の必要性

前節にて述べたように、環境の変質による社会的命題の変化に応じて、環境を評価する技術体系や制度は進化を遂げてきている。21 世紀に入り持続可能な社会に向けて、地球温暖化防止、資源循環の健全化や自然共生型への転換といった課題がいつそう具体的なものとなり、それらの課題克服に対しては現状を把握する科学技術とそれを用いた施策の設計、さらに実現させる環境政策が果たす役割は重要である。そのために、これからは個別施策の計画と評価だけでなく、代替的な複数の将来シナリオを設定し、各シナリオの状況下で有意となる施策を科学的に明らかにするシナリオ分析によるアプローチが有効な手法と考えられる。

環境管理モデルを支える知的基盤としてのシナリオアプローチは、水環境や大気環境、生態系を含む不確実な要素の多い将来に向けた構想や柔軟な戦略的計画を支援するためのツールとして、いまでは地位を確立しつつある（Van der Heijden, 1997・Schwartz, 1991）。将来の不確実性に対して、起こりうる複数の非連続的な環境変化のシナリオを想定し、そのインパクト分析等を通じて、その変化に耐えうる戦略策定を模索するものである。これにより、不確実性に関わる環境要因がアウトカム指標にいかなる影響を与えるかが理解できるため、関係主体間での認識の共有とコンセンサスの醸成が促進されることが期待される。

例えば、IPCC 第 4 次報告（2000）による温室効果ガス排出・緩和シナリオ（SRES）や流域の視点からは水資源や水環境を扱ったシナリオが注目される。IPCC（2000）のシナリオでは、変化に対する頑健性を有する対策や技術革新案の選択が支援されているが、シナリオの実現可能性そのものは示されていない。世界水ビジョン（William *et al*, 2000）は、人間社会の作用が水資源の動向を左右している様相を扱い、内部のロジックから将来の出来事を位置づけて、ステークホルダーの意思決定や代替的な世界の展望と選択を可能としている。国連ミレニアム生態系アセスメント（2005）では、地球規模での生態系サービスの評価に加えて、合計 18 の地域での個別評価を実施したうえで、それらの現状と動向を探り、未来シナリオの作成による対策選択肢の展望について分析している。このように、いずれの研究とも複数の将来像を設定し、

幅をもたせた将来像のもとで施策評価を行なうことで、将来の不確実性を認めつつ施策の頑強性を追求することを目的としたものである。

我が国においても、近年シナリオの策定が様々な領域において進められている。前章で述べた内閣府総合科学技術会議による「環境分野」での5つのイニシャティブ研究が、シナリオ主導型の研究開発を促進する仕組みとして設定されて以降、国土交通省（2004）による「2030年の日本のあり方を検討するシナリオ」や滋賀県（2007）による「持続可能社会の実現に向けた滋賀県シナリオ」など持続性を測る研究開発のみならず、具体的な政策や施策の構築が進められつつある。

#### 2.2.4. まとめ

地域から地球規模レベルまでに至る我々を取り巻く環境の変質を認識し、自然環境や生態系劣化を防ぐために制度化されたアセスメントの進化とそれに伴う評価技術体系の研究開発の発展から政策シナリオの形成に至るまでの変遷を整理した。それにより、今日の社会的命題である持続可能な社会の構築に向けて、持続性指標を明確化しそれを確保するための評価技術体系が必要であるのみならず、個別施策の計画と評価だけでなく、代替的な将来シナリオを設定し、各シナリオの状況下で有意となる施策・政策を科学的に明らかにすることが求められていることが分かった。法制度では、EIAに続いてSEAの仕組みが取り入れられ、複数案の検討を義務づけるなどアセスメントに際して広域を意識できるようになり、地球規模での持続性を考えるうえで必要とされる視野の拡大が期待でき、計画のさらに上位の段階へのアセスメントへと進む可能性が示唆された。

### 第2.3節 流域圏環境管理技術開発

前節で述べたように、自然環境や生態系が保全されるためには、対象とするスケールを設定した後、それらを科学的認識に基づいて適切に評価する枠組みの開発が重要である。「流域圏」を国土の一つの管理単位とした場合の最重要課題は、水循環により駆動される物質（有機物、栄養塩類、土砂）が水系を通じて沿岸域・湾域へと供給されるシステムの健全性を考慮した管理である。例えば、文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクト（2006～2010年度）の中では、「生態系サービス」によって流域圏の持続性を測る評価手法の開発に努力が注がれてきた（辻本ら，2007）。そこでは、持続的な流域圏の構築に向けて、自然共生型環境管理によって、持続性の脅威となっている資源枯渇、地球温暖化、生物多様性の喪失が緩和できるとされている。とくに、流域圏全体での生態系サービスの享受を推進することによって化石燃料を代替でき、温室ガス排出抑制を支援するとともにさまざまな種類の景観の代表種の生息場保全が生物多様性保全につながるといううえで、政策シナリオごとに流域圏の「持続性」を評価できるアセスメント技術の確立が目的とされている（辻本ら，

2008).

湾内水質の改善に注目が集まった従来型イニシヤティブ研究と異なり、辻本ら（2008）による伊勢湾流域圏研究プロジェクトでは、陸域・湾域を含めた「流域圏」全体で生態系サービスが享受できるような「自然と人間の関係性」の保全に着目し、流域圏全体での持続性の確保を目指している。湾域においても、水質向上だけでなく、生態系保全と水産活性化にまでいたる仕組みをターゲットとしていることも特徴であることから、陸域と湾域双方での効果を総合的に評価する仕組みをもって、様々な施策が戦略的に位置づけられることを想定している。

本節ではそれらの研究成果について、まず流域圏管理において必要となる基本的概念を整理した後、流域圏での持続性が評価可能となるように構築したアセスメント技術体系について述べる。さらに、そのアセスメント技術を用いた政策シナリオ評価への展開についても考察を加える。

### 2.3.1. 基本コンセプト

#### (1) 流域圏の捉え方-さまざまなフラックス網と景観-

流域は、図-2.1 に示すように、各地に散在した特徴的な「かたまり」としての「景観」が、水循環に駆動されるさまざまな水・物質フラックスのネットワークで連結されていることが最大の特徴である（辻本ら，2008）。ここでの「景観」とは、水循環が駆動する（1）水，土砂のフラックスが作り出す「物理基盤」，（2）そこに生息する「生物相」，（3）生元素を主体とする「物質循環」の相互作用系により形成されるものである。これにより生態系が形成されるため、「景観」は「生態系」そのものであるといえる（辻本ら，2008）。フラックスが流域内に散在しているさまざまな景観を通過することによってもたらされる恩恵がまさに「生態系サービス（ES）」である。流域に散在する景観（地先）は、フラックス網に依存してさまざまな生態系サービスをその地先に累積するとともに、「フラックス変化（ $\Delta\phi$ ）」をもたらし、その変化はフラックス網を介して流域全体に伝播する。一方、このような流域がもたらす自然のシステムに加えて、我々人間は人口増加にともなう経済効率の向上を目指し、流域内にさまざまな人工的なシステムを加えてきた。自然の恵みをもたらす景観を、下水処理場や発電ダムなどに代表される人工施設に置き換え、灌漑水路や上下水道などの人工系フラックスがそれらをつなぐことによって人間活動の向上を高めてきたといえる。さらに、これら人工系のフラックス網は、隣り合う流域同士をもつなぎ、さらには沿岸域・湾域へも伝播する。本研究では、このような湾を囲む複数流域群と沿岸域・湾域を含む集合体を「流域圏」として捉えることとする（図-2.2 参照）。

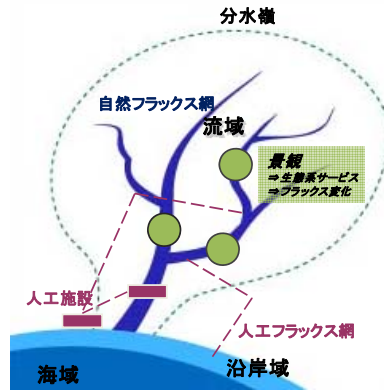


図-2.1 流域 (辻本ら, 2008)

(緑丸：流域上の景観，青流線：自然フラックス網，赤点線：人工フラックス網を表す)

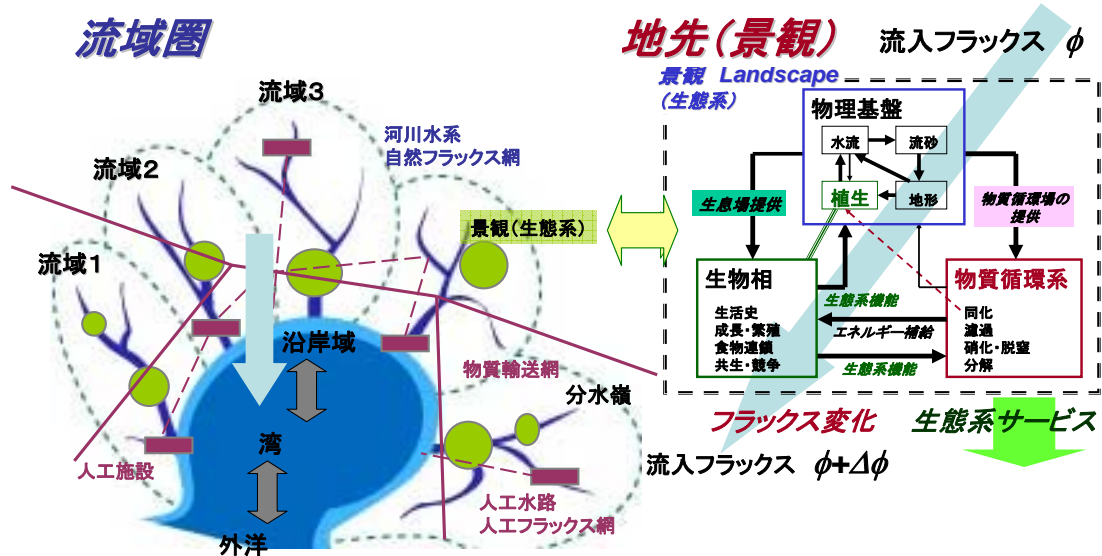


図-2.2 流域圏と個々の景観の役割

## (2) 自然共生と生態系の仕組み

前節で述べたように、特徴的な景観には固有の生態系が育まれており、それらを一体とみなして景観というものを捉えている。生態系は、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る生物相，物質循環を含む相互作用系であり，図-2.2の右側の図がその仕組みを表している。これをより詳しく見ると，物理基盤は，水流，流砂，地形や植生の相互作用であり，また生物相も個体の成長や繁殖，そしてそれに関わる食物連鎖，競争・共生などの相互作用系であり，また物質循環もそれぞれの物質の様態変化などの仕組みを持つ系である。生物相とそれによる物質循環は，生物へのエネルギー供給（一次生産や同化作用），枯死，代謝・分解などで相互に関わりあっている。これら各々の相互作用がまさに生態系機能（Ecosystem Function）である。

伊勢湾流域圏研究プロジェクトで想定されている自然共生型シナリオでは、健全な生態系の保持により、生物多様性保全はもとより、多様な生態系サービスが享受できることによって化石燃料代替や温室ガス排出緩和が進み、また資源枯渇や地球温暖化の脅威の緩和が図られることが期待されている。そこで、流域圏での持続性を測る指標となる「生態系サービス (Ecosystem Service)」に着目すると、生態系サービスは「生態系から由来した人類の利益になる機能」と定義されており (国連ミレニアムエコシステム評価, 2007)、さまざまな生態系サービスが挙げられている。生態系サービスについては、その価値をなんらかの形として評価しようとする試みが色々となされており、それらを 17 種類に分類した上でそれぞれの経済的価値を見積もろうとする研究 (Constanza *et al*, 1997) の他、国連ミレニアムエコシステム評価 (2007) が地球規模の生態系に関する評価指標として生態系サービスを活用したことから、今日では広く認知されつつある。本研究においても、国連ミレニアムエコシステム評価における生態系サービスの議論や分類を踏まえて、生態系サービスについて図-2.3 のように概念の整理を行った。生態系の相互作用により生み出される生態系機能としての「生態系サービス」が、流域圏管理において重要となる空間スケールの違い (地先や流域圏など) を考慮しながら、それらが持続性指標へ集約される過程を追うことは重要である。

生態系サービスは、国連ミレニアム生態系アセスメントの分類を参考にすると、①基盤サービス、②調整サービス、③供給サービス、④文化的サービスに大別される。これと前述した生態系の構造・機能との関連で理解すると、各々のシステムはフローとストックの構造を有していることが分かる。すなわち、生態系サービスにおける基盤サービスは水・土砂・その他物質の循環過程に対する生態系の作用によって創出されるため、他のサービスの基盤となり、フラックスの伝播と水・土砂フラックスのストックとしての水域・陸域や土壌の形成を通して生息場提供サービスを受け持つ。物質フラックスの水フラックスに対する比は物質濃度 (水質) として地先に現れ (状態)、調整サービスとなり、また、生元素のストックは生物バイオマスとして、衣・食・住に関わる供給サービスとなる。これらは、図-2.3 に示したように、調整や供給サービスは各地先が水質浄化や炭素吸収を受け持ち、また各地先へ食糧・資源を供給していると捉えることができる。それゆえこれらは、化石燃料代替や温室効果ガス排出緩和として統一的に評価することが可能である。生息場提供については、地先では典型種や注目種の保全が対象となるが、流域圏では各景観によって対象種が異なり、それらの空間分布によって生物多様性と関連付けることができるものとする。これらは、いずれも流域圏での持続性への脅威 (資源枯渇、温暖化、生物多様性損失) の軽減量を測るものでもあるため、「持続性指標」とみなすことが可能である。さらに、文化的サービスは物質ストックやフラックスによる濃度変化などに対して主観的に決まるものであるが、これらも自然共生型環境管理を進める上においては関係主体とのコンセンサスの向上を計る一助となるなど社会的制約条件を解きほぐす役割を果たすものと考えられ、その意味で重要な指標となりうる。

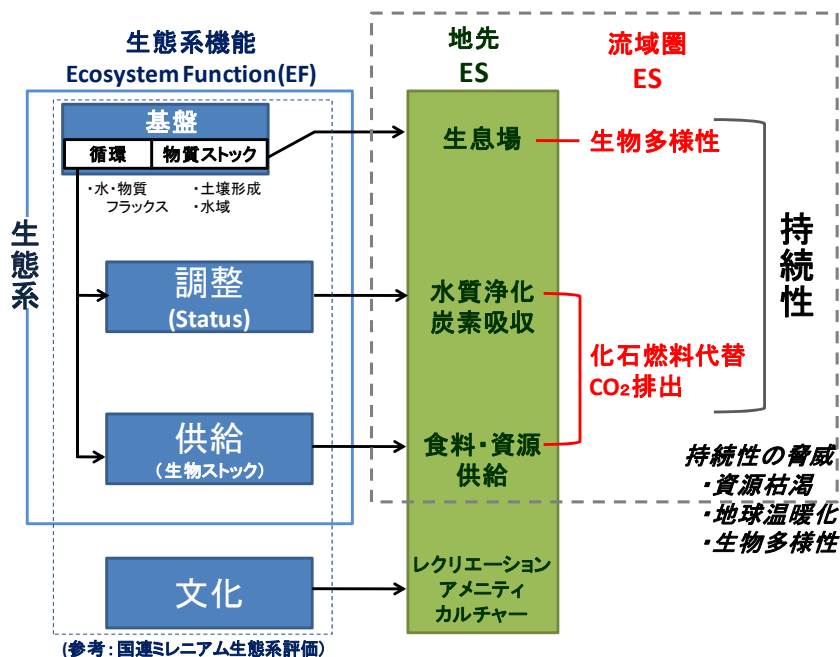


図-2.3 生態系サービスの概念の整理

### 2.3.2. 流域圏環境アセスメント技術の構築

自然共生型流域圏環境管理におけるアセスメントでは、高度な経済・産業活動を成立させていた化石燃料の大量投入を生態系サービスで代替させるために、生態系の保全と持続性を確保していくことが重要な視点となっている。生態系を良好に管理し、できるだけ多くの生態系サービスを享受できる流域圏に向かう施策を定量評価するためには、まず科学的に流域圏を記述することが必要である。

#### (1) 流域圏モデルの開発

先述したような流域圏の捉え方とフラックスが個々の景観を通過することにもなって「フラックス変化 ( $\Delta\phi$ )」と「生態系サービス (ES)」が生み出される仕組みをもとに、流域圏を模式的に示すと図-2.4 のようである。流域圏のアセスメントモデルは、流域圏の自然系と人工系からなるフラックス網を解析する Tool Box 1, 各地先ごとの生態系のメカニズムに基づくフラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) と生態系サービス (ES) を算定する Tool Box 2, および各地先に蓄積されるさまざまな生態系サービス (ES) を流域で統合評価する Tool Box 3 から構成される。図に示すように、陸域、海域別にフラックス網を記述する Tool Box 1 を基盤として、その上に Tool Box 2 が地先ごとに配置され、フラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) は Tool Box 1 に統合される。地先の特徴的な景観 (類型景観) ごとに用意された Tool Box 2 がフラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) と生態系サービス (ES) の算出に適用されることになる。また、各地先に蓄積される個別の生態系サービス (ES) は、Tool Box 3 においてコンセンサスが得られた評価軸に基づいて標準化・統合化されることになり、これが流域圏環境の統合評価に向けたアウトプットとなる。

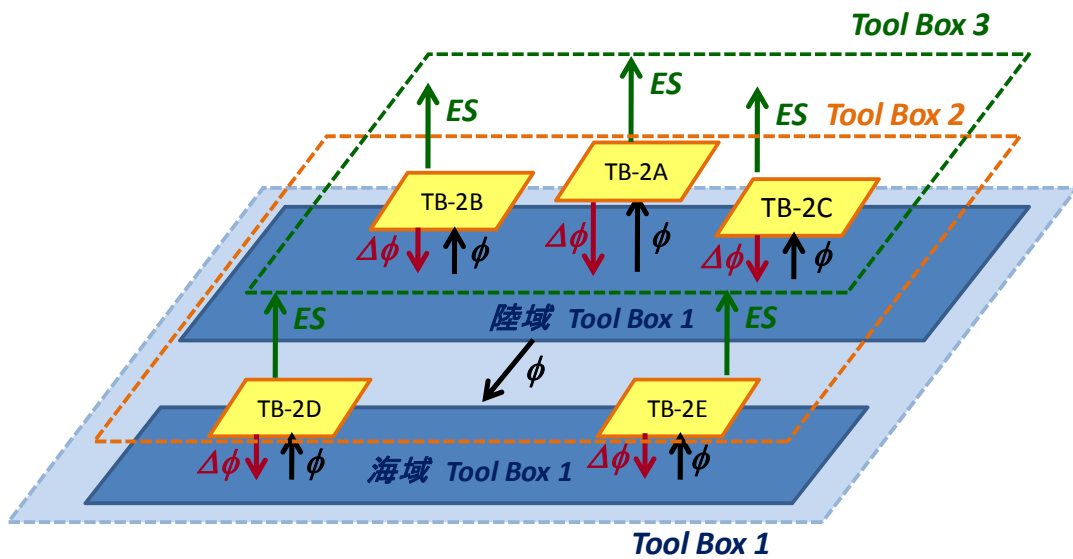


図-2.4 流域圏アセスメントモデル

流域圏全体での施策効果を比較しようとするとき、様々な地先での様々な施策の水・物質フラックス網へのフィードバックを簡便に行うことができ、また他流域への適用が可能な水・物質循環計算ツール（Tool Box 1、図-2.5 参照）を作成することが必要である。「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクトでは、流域の特徴的な空間特性を小集水域分割によって表現し、様々なメッシュデータをそれに内外挿した分布型流出モデルを組むことによって、流域で実施される施策による状況変化を適正に評価でき、かつ、様々な施策を様々なパターンで思想的に組み合わせて試行できる迅速性に配慮したモデルが構築されている（高岡ら、2010）。そこでは、人工フラックスや施設も点源や面源として組み込まれている。

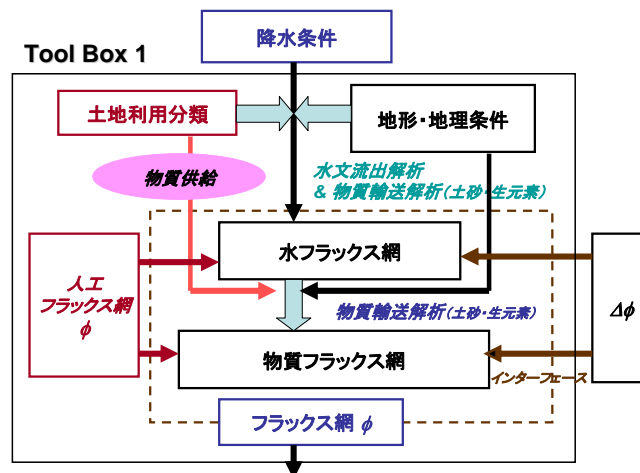


図-2.5 Tool Box 1 の構成（辻本ら、2009）

## (2) 地先景観についての生態系モデル

伊勢湾流域圏研究プロジェクトでは、流域に散在する地先景観での生態系の機能に着目しており、その働きを評価するモデル (Tool Box 2) が各々の景観で開発されている。図-2.6 には、図-2.2 で示したような相互作用系から成る生態系の構造に基づいて、「フラックス変化 ( $\Delta\phi$ )」と「生態系サービス (ES)」が評価される基本的な構成を示す。生態系は、さまざまな空間で独自のものが醸成され個別的であるとはいえ、アセスメント技術として特徴的な景観における生態系機能の評価手法を一般化するため、「類型景観」の概念が導入された。「類型景観」とは自然地形や土地利用などで類型化された空間であり、生態系の構造が相似な景観である。すなわち、同じ「類型景観」に属するところでは、フラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) と生態系サービス (ES) を算定する手法は共通であるとして捉えられている (辻本ら, 2009)。

河川水系を例にとり、第1章で述べた河川生態学術研究の木津川下流をフィールドとする木津川研究グループに着目すると、交互砂州を伴う砂床河川の一般的特徴を見出す研究がなされている。そこでは、河川水系をセグメントスケールで「類型化」し、その特徴をそれよりミクロなスケールの景観要素(二次流路やたまりなどの水域、礫帯や細砂マウンドなどの裸地域、草地や樹林域などの植生域など)の受け持つ機能の集合として捉えようとしている。河川のセグメントでは、これらの景観要素がさまざまな生息場の提供、さまざまな生元素物質循環の素過程の生起場の提供を受け持つ (尾花ら, 2009)。

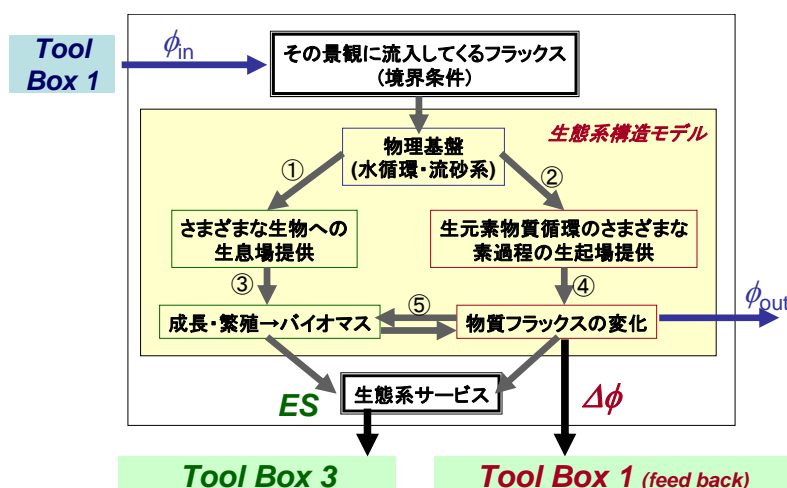


図-2.6 Tool Box 2 の構成 (辻本ら, 2009)

図-2.6 に示すように、物理基盤の性状に応じた①生息場評価については、PHABSIM (Physical Habitat Simulation) あるいは HEP (Habitat Evaluation Procedure) の考え方 (Nestler *et al*, 1989) が導入される。これらでは、物理指標ごとの生息適性 (選好性) から対象とする領域の生息適性 (WUA=Weighted usable area) を評価するものであるが、ここでは、景観要素ごとにそれを適



用し、各景観要素の生息適性価値をその面積比率に応じて重みつき平均で対象地先での生息適性を評価しようとしている。同じ手法で、②生元素物質循環の素過程の生起適性を各景観要素で評価し、景観要素面積比率を重みとして各過程に応じて生元素物質循環ポテンシャルを評価しようとするものである。このような手法は、河川の類型景観（セグメントレベル）の生息場提供、物質循環生起場提供ポテンシャルを評価することに適用が試みられている（尾花ら, 2009）。このように評価されたポテンシャルに基づいて流入フラックスに応じた③生体量評価、④フラックス変化量評価が必要となる。

上述した仕組みに応じて、流域圏上で Tool Box 2 が開発された特徴的な景観とその変質、さらにそこで注目されるべき生態系機能の例を表-2.1 に示す。

表-2.1 さまざまな類型景観の生態系機能とその変質

位置	生態的機能	変質(修復)
森林	樹林生育	森林管理
河道(礫床)	底生生物, 魚類, 流下有機物	流況, 土砂, アーマリング, 砂礫堆(裸地)
河道(砂河川)	植生, 川原生物生息 流下有機物, 硝化・脱窒	流況・土砂, 河床低下, 砂州, 植生繁茂, 地形・表層
河道(感潮区間)	干満時浸透, 有機物, 脱窒	陸化・植生繁茂
河川→水田 複合農地 (灌漑施設・水田, 畑地)	生物生息 脱窒, SS除去	河川との横断的連続, NW, 用排水, 水管理, 施肥
汽水湖沼	底泥, 脱窒	底泥, 水質(←農地, 住宅)
干潟	塩性植物, 底生生物, 物質循環	河川流砂・漂砂→地形変化
湾(浅場)	アサリ生息・漁獲, 浄化	河川流砂・流況→地形変化 浚渫, 干拓(埋立), 水産

### (3) Tool Box1 と Tool Box2 の連結性・階層性

先述した枠組みに示すように、フラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) と生態系サービス (ES) は、地先ごとの Tool Box 2 によってその固有性に応じたフラックスの質や生態系サービスの種類、さらには施策の効果によるこれらの変化をも含めて評価される。

特徴的な景観としては、森林域、貯水池—農地—排水路連結系、水田—河川の連結した氾濫原、下水道未整備で農地・住宅密集した滞水域流域、砂州や干潟をともなう河道、アサリの生活史や水産の場としての干潟などが挙げられ、その各々でフラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) と生態系サービス (ES) を算定する手法が確立されている。図-2.7 は、流域圏での各類型景観 (Tool Box 2) の連結性を示した。最上流域に位置する森林域をはじめとして各地先における生態系の機能の発揮に伴って生態系サービス (ES) が各地先に蓄積されるとともに、フラックスの変化 ( $\Delta\phi$ ) が生じ、それは下流域へ伝播されるという仕組みで流域をつないでいる。Tool Box 1 の水・物質フラックス網解析により算定された流入フラックスが Tool Box 2 へ与えられ、各地先の Tool

Box 2により算定されたフラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) は、Tool Box 1にフィードバックされるように仕組みられている。すなわち、Tool Box 1とTool Box 2は入れ子構造になっており、階層性を有している。例えば図-2.8に河道のTool Box 2の一例を示すように、Tool Box 2は対象とする特徴的な空間に応じてTool Box 1とは異なるスケールを有し、またTool Box 2における生態系機能の解析では、瀬・淵や砂州の陸域・植生域などのさらに小さいスケールの景観要素に分割して議論が進められ、機能の特性に応じてモデリングされる。

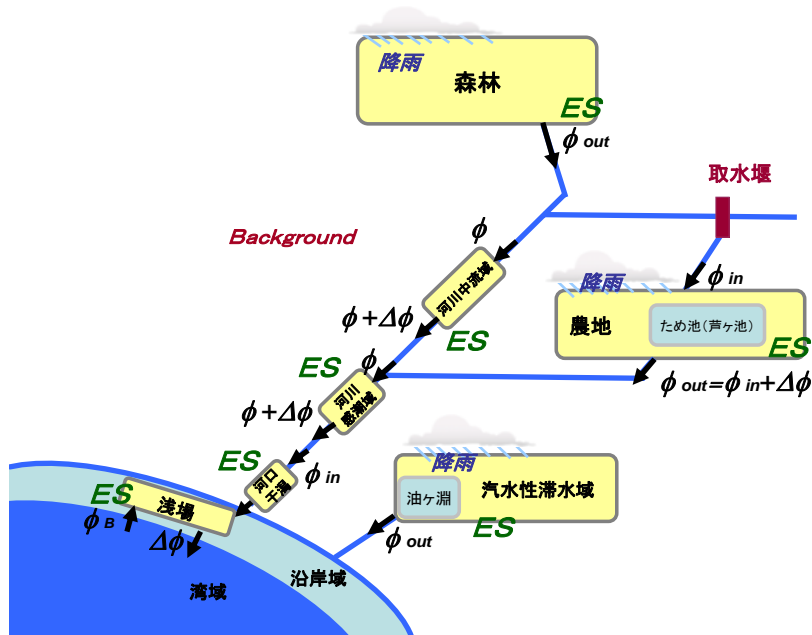


図-2.7 各類型景観における Tool Box 2 の連結性

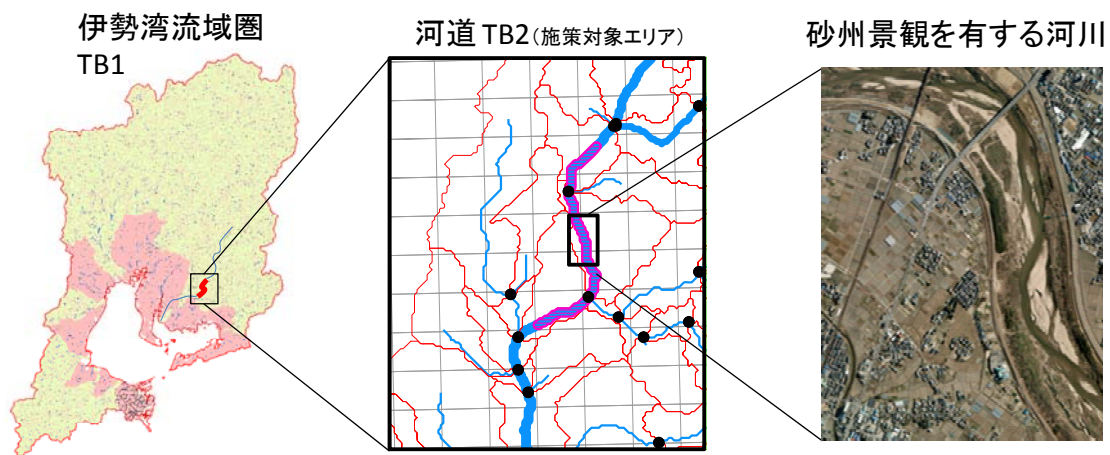


図-2.8 景観スケールの階層性

### 2.3.3. 流域圏アセスメント技術を用いたシナリオ評価への展開

自然共生型の流域圏へ向けて、構築したアセスメント技術の駆動により流域圏の過去からの変遷と現況の状態を把握する必要がある。その認識をもって、どのような自然共生施策が将来に向けて効果的であるかをいくつかの施策をグループ化したシナリオをもとに検討し、流域圏の持続性を確保する道筋を明確にすることが望まれている。

まず、流域圏の気象や地形条件と現状での土地利用、人間活動の状況に対しては、Tool Box 1の適用によって水・物質フラックス網が計算され、入手可能なフラックスの観測データをもとにパラメータ調整などを行う。この水・物質フラックス網を用いて、流域圏での特徴的な景観での生態系サービスが Tool Box 2 の適用によって算定される。前節で述べたように、各地先からの ES は、水質浄化、炭素吸収、食料・資源供給や生息場提供という 4 種の生態系サービスに大別された後、それらのサービスを生態系から得る場合の化石燃料代替あるいは温室効果ガス排出抑制として標準化され、流域総合値としての自然共生度が検討可能となる。

次に、流域圏の過去からの変遷を同様の手順で把握する。過去の基準年（1960年）からの30年間程度を想定すると、その間にはさまざまな施策が実効されるとともに、政策による社会・産業形態の変化などがあつた。これらの変化の結果としての人口分布や土地利用変化、また産業形態変化にともなう負荷原単位変化などを推定することが可能であり、Tool Box 1への入力データとしてこれらを用いて変化させる。このように、過去からの変遷は、Tool Box 1へ入力する土地利用等のバックグラウンド的な条件を変化させることによって表現できると同時に、TB2により流域圏の自然共生度も算定されるため過去からのESの変遷の理解が可能となる。流域圏の環境管理として最も重要なことは、流域圏の過去からの変遷と現況の認識から、どのような自然共生施策の組み合わせが生態系サービスを最大限に享受できるシナリオとして最も効果的かを提案することである。さまざまな各地先での施策をグループ化したものを「将来シナリオ」と考え、将来シナリオごとの自然共生度が見積もられる。以上のような、水・物質フラックス変化を軸とした過去から現在、さらに将来シナリオによる流域圏の自然共生度を、各地先におけるES発現の強度を考慮しながら算定できる仕組みを図-2.9に示す。

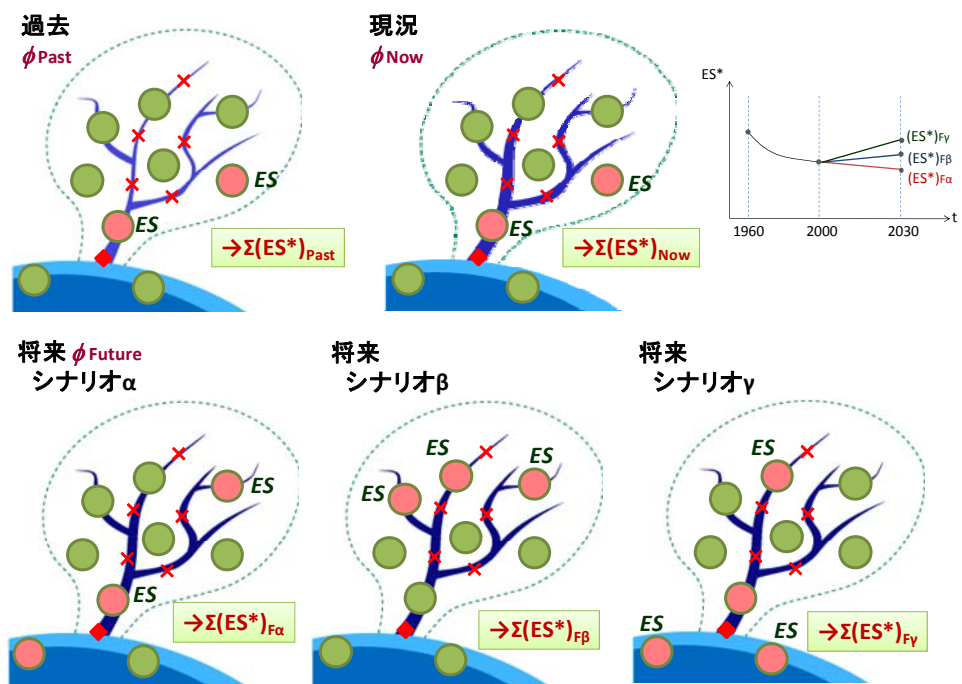


図-2.9 流域圏自然共生度の変遷と地先での効果

## 第 2.4 節 結語

本章では、我々を取り巻く環境の変質を認識し、自然環境や生態系劣化を防ぐために制度化されたアセスメントの進化とそれに伴う評価技術体系の研究開発の発展から政策シナリオの形成に至るまでの背景に沿って、自然共生型流域圏環境管理技術体系の構築に向けた伊勢湾流域圏での試みを述べた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 陸域、沿岸域と湾域から成る流域圏で、水・物質フラックス網を算定する Tool Box1 と各景観での生態系記述モデルである Tool Box 2, また流域圏総合評価を担う Tool Box3 の構成を有するアセスメント枠組みを構築した。
- 2) 流域圏の構造と機能の捉え方を明確にした上で、各地先での質の異なるフラックスや生態系サービスの算定に際し、「類型景観」の概念を導入することによって、同じ類型景観に属するところでは、フラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) と生態系サービス (ES) を算定する手法は共通であるとした。
- 3) 流域圏が有する景観スケールの階層を取り扱うことが可能なモデルであるため、流域圏スケールでフラックス網を算定する Tool Box 1 と各景観での生態系記述モデルである TB2 が連結する仕組みを明確にした。すなわち、Tool Box 2 で算定されたフラックス変化 ( $\Delta\phi$ ) は、Tool Box 1 へフィードバックされることにより、各地先での施策実施効果はフラックス網全体に反映される仕組みを持つ。
- 4) 上記のアセスメント技術が、どのような自然共生施策が将来に向けて効果的であるかをいくつかの施策をグループ化したシナリオをもとに検討し、流域圏の持続性を確保する道筋を示した。

本章で提案された生態系サービスを指標とした流域圏環境評価モデルでは、流域圏の景観スケール階層性の取込みを可能にしたことが大きな特徴である。それにより、各景観が担うフラックス変化や生態系サービスを流域圏モデルへ反映させることが可能である。そのため、流域圏景観の中でも、特にその動的要素としての河川生態系を有する河川景観への着目は重要であり、次章では河川を対象に、河川生態系管理に向けた評価技術体系の構築を試みる。

## 参考文献

- 浅野直人監修：戦略的環境アセスメントのすべて，株式会社ぎょうせい， pp.258, 2009.
- 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 卷， pp.1183-1188, 2009.
- 国土交通省：公共事業の構想段階における計画策定プロセスガイドライン解説，国土技術政策総合研究所資料，第 533 号， pp.62, 2009.
- 国土交通省：2030 年の日本のあり方を検討するシナリオ作成に関する調査概要， 2004.
- 自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシャティブ報告書，総合科学技術会議， 2005.
- 滋賀県：持続可能社会の実現に向けた滋賀県シナリオ， 2007.
- 内藤正明，森田恒之：「環境指標」の展開—環境計画への適用事例，日本計画行政学会， 1998.
- 辻本哲郎，戸田祐嗣，尾花まき子：「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクトのねらい，河川技術論文集， Vol.13, pp.291-296, 2007.
- 辻本哲郎，戸田祐嗣，田代喬，尾花まき子，佐藤圭輔，椿涼太：自然共生型流域圏環境アセスメント手法に関する基礎的研究，河川技術論文集， Vol.14, pp. 367-372, 2008.
- 辻本哲郎，戸田祐嗣，尾花まき子：自然共生型流域圏管理のための生態系評価への水工学的アプローチ，水工学論文集，第53巻， pp. 637-642, 2009.
- 辻本哲郎，戸田祐嗣，高岡広樹，尾花まき子：湾を内包する流域圏の自然共生型アセスメントの構成に関する研究，環境システム研究論文集， Vol.38, pp.37-42, 2010.
- 高岡広樹，戸田祐嗣，辻本哲郎：伊勢湾流域圏を対象とした水・物質の流出解析に関する研究，河川技術論文集，第16巻， pp.305-310, 2010.
- 平成18年度採択文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究成果中間報告書， 2009.
- 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.
- 森主一：動物の生態，京都大学学術出版会， pp.582, 1997.

岸田弘之, 藤田光一, 天野邦彦, 望月貴文, 菊池佐智子 : 生態系サービス評価モデルを用いた施策群比較, 文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」平成21年度研究成果報告会, 2009.

Constanza R. et al.: The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature* 387, pp. 253–260, 1997.

Intergovernmental Panel on Climate Change: Special report on emissions scenarios, Cambridge Univ.Press, 2000.

Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystem and human well-being synthesis, Island Press, Washington DC, pp.212, 2005.

Nestler, J.M., R.T. Milhaus and J.B. Kayser : Instream habitat modeling techniques, *Alternative in Regulated River Management*, edited by J.A. Gore and G.E. Petts, CDC Press., 1989.

Schwartz, P.: *The art of the long view- Planning for the Future in an Uncertain World*, Doubleday, 1991.

Tsujimoto, T., Y. Toda and M. Obana : Assessment framework of eco-compatible management of river basin complex around a bay, *Advances in Hydro-Science and Engineering*, Vol.8, 9p. on CD-ROM, 2008.

Tsujimoto, T.: Structure and functions of river ecosystem, Keynote Lecture, Proc. 8th International IAHR Symposium on Ecohydraulics, Seoul, Korea, CD-ROM, 2010.

UNCED : Rio declaration on environment and development- Report of the United Nations conference on environment and development, 1992.

Van der Heijden, K.: *Scenarios, strategies and the strategy process*, Bruekelen, Nijenrode Univ. Press, Nijenrode research papers series center for organizational learning and change, No.1997-01, 1997.

William J.C., R.R. Frank., World Water Council: *World Water Vision- Making Water Everybody's Business*, Earthscan Pubns Ltd, 2000.





## 第3章 流域圏における河川景観とその管理へのアプローチ

### 第3.1節 概説

ここでは、第2章で示した枠組みに沿って流域圏を捉えていく上で、その重要な構成要素である河川景観の取り扱いを具体的に示す。持続可能な国土管理が求められている今日、流域圏での持続性の確保に向けては、流域圏を構成する森林、農地、都市、河川、沿岸域、湾域など各景観での努力が必須である。前章で述べた自然共生型シナリオ下での流域圏環境管理技術体系における各景観に内在する役割は、持続性を測る指標としての生態系サービスを、各景観での特徴的な生態系の構造と機能を捉えた上でのモデル化により、フラックス変化とともに算定する手法を構築することである。そこで本章では、上述したように、流域圏の景観の中で恒常的にフラックスが存在している場であり、特に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。河川には、様々な空間スケールに応じた構造が存在し、大きな空間スケールの構造の中に幾つかの下位の構造が入れ子状に収まって存在していると捉えられている (Frissell *et al.*, 1986)。縦断方向の連続性で河川を見ると、溪流や山地河川、扇状地河川、沖積地河川といった特徴のある区間に分類できる。この分類単位は「セグメント」(山本, 1994)と呼ばれており、河川の基本構造を捉える上での重要なスケールとして認識されている。

本章では、砂床河川の交互砂州を有するセグメントを対象とする。砂州を伴う砂河川での河川環境管理目標は、しばしば「砂州景観の保全」とされている(たとえば、淀川水系木津川河川環境管理計画, 1997)。その具体的施策を明確にするためには、どの砂州のどの部分が河川生態系として重要なのかを明確にする必要がある。そのために、まず河川生態系を評価する上で重要となる「河川景観」や「河川生態系の構造と機能」、「生態系サービス」などの基本概念を、既往文献を踏まえながら整理を行ったうえで、本研究におけるそれらの捉え方を論じる。さらに、それらの概念に基づいて、砂河川交互砂州形成区間での河川生態系管理に対する景観からのアプローチの有効性を示す。

### 第3.2節 河川景観と河川生態系の構造と機能

#### 3.2.1. 河川景観のスケール階層性・連結性

河川景観は、様々なスケールの景観によって構成される階層構造を有している。例えば物理景観を見ても、山本(1994)の行った主に沖積平野を対象とする整理によると、流域を構成する一要素であるセグメントは縦断勾配、河床材料、河床形態や植物の生育状態などにより規定

され、それが河道の骨格構造となる。このセグメントの特徴を備えた一区間を「リーチ」、リーチを構成する単位要素を「ユニット」、さらにユニットを構成する空間要素を「サブユニット」と定義することによって、河川景観の階層性が明らかにされる。

本章で取り上げる交互砂州が形成されるような河川を想定し、Frissel *et al.* (1986) や Pool (2002) が整理した様々なスケールの構造や特徴を参考にすると、図-3.1のように描くことができる。この区間では、砂州がこのセグメントの骨格構造であり、そのペアがリーチスケールに相当する。リーチの中には瀬・淵などのユニット（サブリーチ）が存在する。さらにユニットスケールを絞り込み、砂州の表層被覆の違いを見てみると、樹林帯や草地などの植生域や砂礫帯や細砂マウンドなどの裸地域、たまりやわんどを含む一時水域、滯筋や二次流路などさらに小さい空間スケールの「景観要素（サブユニット）」から成り立っていることが分かる。図の中には、表流水と砂州を伏流する伏流水などのフラックスが描かれ、これらは各景観要素を連結する重要な役割を果たしている。

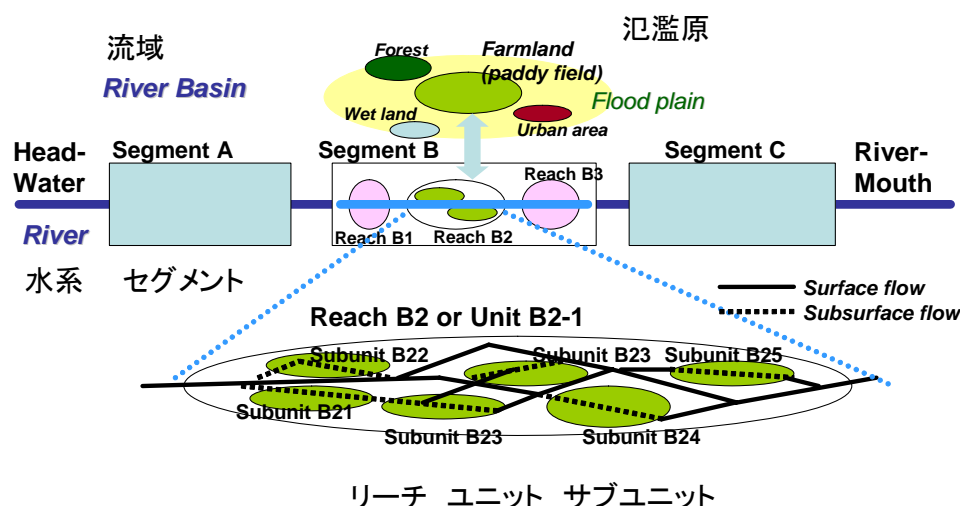


図-3.1 河川景観の階層構造 (Tsuji moto, 2010)

また、それら河川景観が形成される時間スケールの概念も重要である。空間スケールの大きな景観（セグメントスケール）は、変化を引き起こす大規模洪水の発生頻度が低いため変化に要する時間が長い。一方、空間スケールの小さい景観（サブユニットスケール）は、小規模洪水（出水）による浸食・運搬・堆積作用により簡単に変化するため、常々一定の形状や位置を保持してはいないという特徴が見られる。このサブユニットスケールでの微小変化については、セグメントスケールで見た場合、それが生じる面積比率は一定に保たれていることが多いと言われており (Frissel *et al.*, 1986)、河川環境管理を考える際には対象とするスケールの設定が重要となる。

このように、河川景観とそれらを構成する要素は、様々な空間スケールの中に入れ子状に収

まり, 表流水や伏流水などによるフラックスの存在によって連結されたシステムを有している。なお, 移動床過程により形成されたこれらさまざまな物理景観は, 生物相や物質循環をとともない, それぞれに生態系を形成しているといえることができる。

### 3.2.2. 河川生態系の構造と機能

生態系とは, 「生物群集とその生活に関係する無機的環境 (物理環境) を含んだ系 (システム)」と Tamsley (1935) により初めて定義された。生態系の重要性やそれを含む概念は, 既存研究の中で活発に議論されているためそれらを踏まえながら, 本研究では特に河川生態系に着目して, 図-3.2 のように整理している (尾花ら, 2009)。

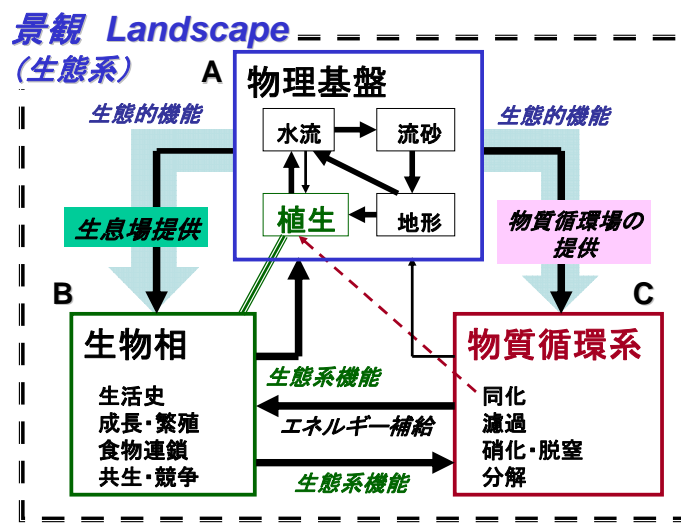


図-3.2 河川生態系の構造と機能

前章で述べたように, 河川生態系の構造は, (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分けて捉えられる。河川生態系の場合, (A) 物理基盤は, 流れ, 流砂, 地形そして生物相の一部である植生が相互作用を及ぼしあって形成され, また変化させられる。(B) 生物相は, 生物群の動態として捉えられており, さまざまな種の個体や群集から構成される。また (C) 物質循環系は, 硝化・脱窒といったさまざまな様態での輸送・変化過程を含む生元素の捕捉・貯留・流出の総体である。これら3つのサブシステムの相互作用 (図中矢印) が「生態系機能 (Ecosystem Function)」と捉えられている。具体的には, 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伴いながら, 生物相と関連している。生物相は物理基盤, 物質循環に支えられている一方で, 両者に作用を及ぼしていると考えられ, 三者の相互作用によって生態系が成り立っている。このうちの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している機能を, 「生態的機能 (Ecological Function)」と定義する (尾花ら, 2009)。また, 生態系が有機的に作用することによって生み出される人間への恩恵が「生態系サービス」(Ecosystem service)といわれるものであ

る。

以上のように、不均一かつ階層的な河川景観の中では、フラックスによる栄養塩動態や有機物のインプットの異なりが生物群集や生態系プロセスにまで影響を及ぼし、特徴的な景観ごとに異なる生態系機能を持つ (Wu *et al.*, 1995) .すなわち、本論文で述べている「景観」とは、移動床過程により形成された物理基盤に、生態系が存在し、様々な生態系機能を有している状態として定義している。

### 3.2.3. 河川の生態系機能と生態系サービスの関わり

上述した砂州上のさまざまな景観要素に着目すると、各々の場の特徴に応じてそれぞれが特徴的な生態系機能を発揮していることが明らかにされている (河川生態学術研究木津川グループ, 2008) .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・物質循環への寄与はまさにそれである。2章では、国連ミレニアム生態系評価の生態系サービスの分類に基づいて、流域圏の各景観における生態系サービスが、流域圏での持続性指標として統合されるまでの過程を述べたが、本節では、河川生態系の各プロセスが、生態系サービスにどのように集約されるかを論じる。河川の生態系サービスとしては、生物生息場と水・物質循環過程における水質浄化や炭素吸収、食料・資源供給が挙げられる。以下では、その中でも、特に物理基盤と生物相の相互作用により成立する水・物質循環におけるプロセスと生態系サービスとの関わりを詳述する。

物質循環過程は、物理・化学的過程と生物学的過程に大別され、巨視的には太陽エネルギーが駆動力となっているが、そのような認識の下図-3.3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。国連ミレニアムエコシステム評価 (2007) では、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しているが、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し、貢献が大きいものから順に矢印の太さでそれを示した。栄養塩循環の素過程としては、捕捉・濾過、同化、硝化、脱窒、異化・分解を取り上げた。有機物を分解することによってエネルギーを得る過程である異化・分解作用は、国連ミレニアムエコシステム評価 (2007) のなかで森林のそれらの作用による炭素吸収が挙げられているように、特に河道内樹木群の働きによるものが大きい。それ以外のものは、水質浄化サービスに貢献する脱窒過程での一プロセスを各々が担っている。他方、有機物の流れは生物バイオマスとして各所に現れ、供給サービスに分類される。

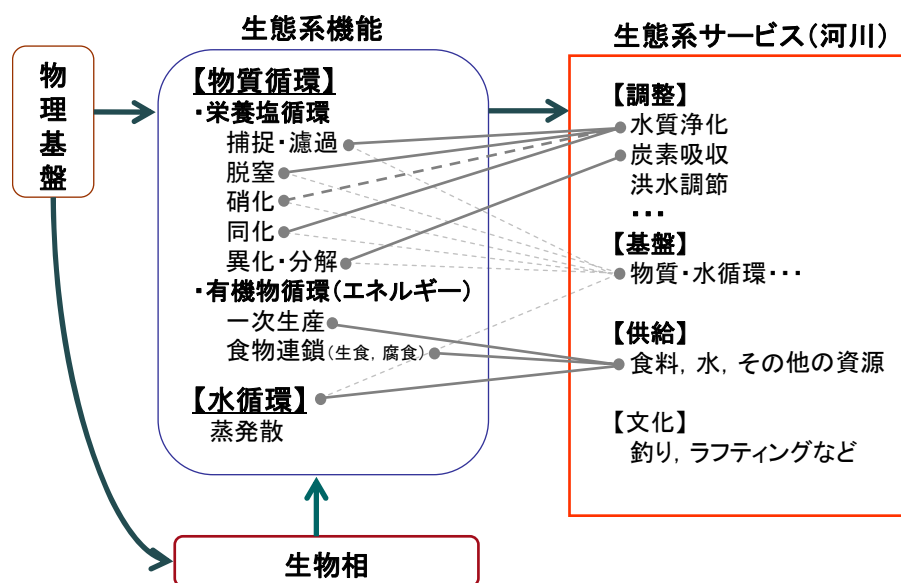


図-3.3 河川の生態系機能と生態系サービスとの関わり

### 3.2.4. 生態系機能のポテンシャル型特性とフラックス型特性

砂州景観が有する生態系機能の発現機構を検討したところ、その場に潜在している特性（ポテンシャル型特性）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（フラックス型特性）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は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。ここでは、前者の生態系サービスを生むポテンシャルを有している特性を、「生態系サービスポテンシャル」（ESP）と定義し（尾花ら，2010），以下では特に、砂州の伏流流動に大きく依存する水質浄化サービスを対象を絞り、物質循環の素過程の中でそれへの貢献の大きい「脱窒」を例にとって議論を進める。

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いる。「脱窒」とは、窒素化合物から分子状窒素を大気中へ放出する窒素循環の最終工程である。一般的には、脱窒能をもった微生物（脱窒菌）の存在とそれらが作用する環境条件、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（脱窒菌の存在とそれらが作用するための環境条件）をさし、供給フラックス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（Shade *et al.*, 2001），特に砂州植生域ではポテンシャルが高いことが明らかになっている（片貝，2009）。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箇所（場）の存在状況は個々の砂州に特徴付けられる場であるが、同時に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、こうした場の攪乱は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うちのいずれが生態系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-3.4 参照）を想定し、図-3.5 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次元的に砂州を見ることとする。ここでの場合、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り、図の①は、元の状態の砂州、 $\alpha$ は出水により植生域 Aa がなくなった場合を想定し、また各々のケースでの物質濃度の流程方向変化の概略グラフを示している。



図-3.4 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）

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(3.1)のように景観の生態系サービスポテンシャルに応じて指数関数的に減少するものとする。同時に、各景観要素での濃度勾配  $\Delta$  すなわち脱窒能力についても式(3.2)のように上流側景観が大部分を担う。

$$C(\xi) = C_{0j} e^{-k_i \xi} \quad (3.1)$$

$$\Delta(\xi) = \left| \frac{dC}{d\xi} \right| = C_{0j} k_i e^{-k_i \xi} \quad (3.2)$$

ここで、 $C_{0j}$  は j 番目の景観での濃度の初期値、 $\xi$  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（流入フラックス）の違いに起因していることが示唆されている。

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、第一に生態系サービスポテンシャル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機能復元の手法となる。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の系統を考慮すると、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-3.5 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って 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、洪水攪乱や人為の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。

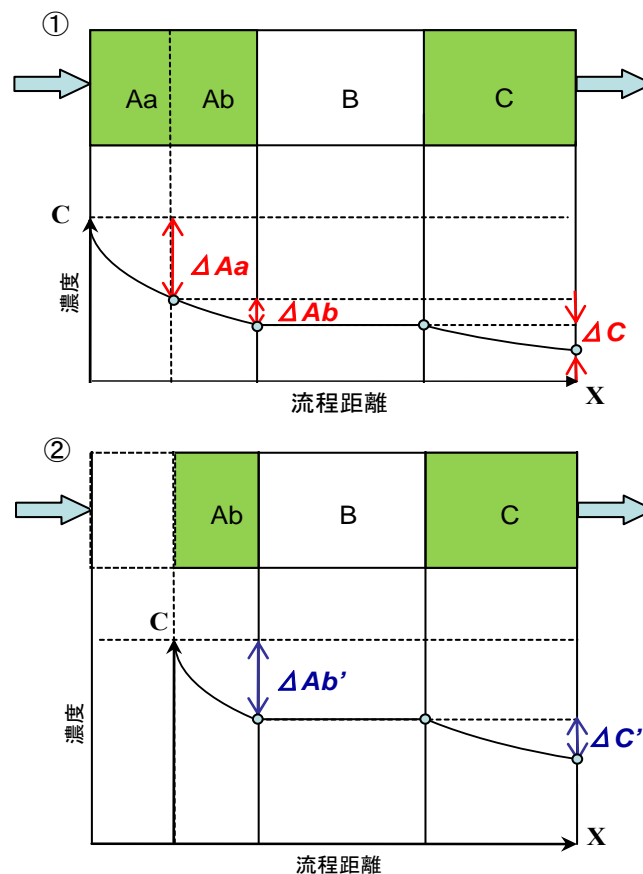


図-3.5 生態系サービスポテンシャル保全の必要性

(網掛部：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)

### 第 3.3 節 既往の生態系機能評価手法と課題

2 章で述べたように、生態系管理におけるアセスメントの実施に際しては、その場の特性や生態系プロセスを捉えた上での生態系機能の科学的な評価・モデリング手法の開発が必要であり、従来からも様々な手法が構築されている。さらに、現在の社会的命題である持続性の確保のためには、各景観での生物多様性の維持が必須であり、それはその他の持続性指標（地球温暖化防止、化石燃料代替）の確保にも繋がるといえる。そのため、ここではアセスメントに有用な「物理条件」と「生態系機能」を関連付けた代表的な評価手法を取り上げる。

「生態系機能」としては、(α) 生物生息場と (β) 物質循環の生起場提供という二つの視点へ着目すると、次の 4 種類が代表的なものとして挙げられる。(α-1) 陸域におけるある生物種の物理環境に対する生息適性度に、その地域の面積を乗じて生息場面積を算出する HEP (Habitat Evaluation Procedures, U.S.Fish and Wildlife Service, 1980), (α-2) IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) の一部として開発された魚類の対象河道内の物理特性に対する生息適性基準（選好曲線）を用いて重み付き利用可能面積 (Weighted Usable Area:WUA) を算出し、魚類の生息空間としての利用価値を示す PHABSIM (Physical Habitat Simulation, Clair Stalnaker *et al.*, 1994), (α-3) 湿地生態系の生態系機能として、地下水流出や洪水調節、水系生物量と多様性などの 11 種を取り上げ、それらに対して機能としての有効度、生息場適性度、社会的価値などの複数観点から評価する WET (Wetland Evaluation Technique, Adamus,P.R. *et al.*, 1983), (β-1) 水域における個体群・群集動態モデルを用いて評価した生物量の変動と移流・拡散などの物質輸送モデルにより把握した水域中の栄養塩動態などを結び付けて記述する手法 (楠田, 1994) などである。

前節で示した異なる時空間スケールを持った河川景観との関連でこれらの手法を見ると、次のような課題が挙げられる。

- 1) 河川景観の階層構造とモザイク状に散在している景観要素間の連結性や相互作用が考慮できていない。さらに、水域評価におけるそのほとんどがメッシュ分割による均一評価のため、明らかに生物がないと思われる不必要な空間まで評価対象としている。
- 2) 攪乱による景観の更新などの時間スケールが十分に考慮されていない。

既往の評価手法における以上のような課題を認識したうえで、砂州景観の評価枠組みを次節にて提案する。



### 第 3.4 節 砂州景観の評価枠組みの構築

環境アセスメントは、大規模事業によって自然に改変を加えようとするときに、その大規模事業が自然生態系に与える影響を事前に予測し、自然の変質を最低限に抑制しようとするものである。そのため、自然生態系を科学的に適切に評価する必要性はすでに述べてきている通りであり、全国の河川に共通化して用いることができる普遍的な評価枠組みの構築は有用である。ここでは、砂河川の交互砂州を有するセグメントを対象としている。砂州を伴う砂河川での河川環境管理目標は、しばしば「砂州景観の保全」とされている（たとえば、淀川水系木津川河川環境管理計画、1997）。その具体的施策を明確にするためには、どの砂州のどの部分が河川生態系として重要なのかを明確にする必要がある。

前節において、河川生態系を捉える上で重要となる「河川景観の階層性・連結性」、「河川生態系の構造と機能」、「生態系機能の発現機構」など概念の整理を行うなかで、生態系機能は各景観特性に応じて発揮されており、フラックスの介入はそれらの発現機構と生態系サービスに影響を与えることが示唆された。

以上から、砂州景観に基づいた生態系評価としては、以下の3つの側面に着目した定量化が望まれる。

- 1) 河川を構成する景観特性を把握し、過去からの変遷を理解すること。
- 2) 砂州景観のどの部分（場）が生態系にとって重要であるのかを把握すること。そのために、保全すべき“指標”を抽出し、その指標の過去からの変遷と現況を把握した上で、保全すべき重要な場を選定すること。
- 3) 砂州景観を通過するフラックスに沿った物質変化量（生態系サービス）を把握すること。

これらのポイントを勘案し、淀川水系木津川で蓄積されている情報を用いて作成した評価枠組みを図-3.6に示す。これらの科学的手法に基づく定量把握ができると、砂州景観を保全するための戦略設計や曖昧であった環境目標の設定に資することが可能となる。

また、対象とするスケールは、セグメントスケールである。セグメントスケールは、水系の特性を表す平均的な一様性を持った河川の骨格構造のスケールであり、内部はリーチスケールによってその特性をより詳細に議論できる利点を有しているため、河川環境管理を行う上での重要なスケールであるといえる。また、評価手法の構築にあたり、微視的な検討を要する箇所については、リーチスケールを対象に議論を進める。

砂州景観の評価枠組み (例:木津川下流 砂州形成区間)

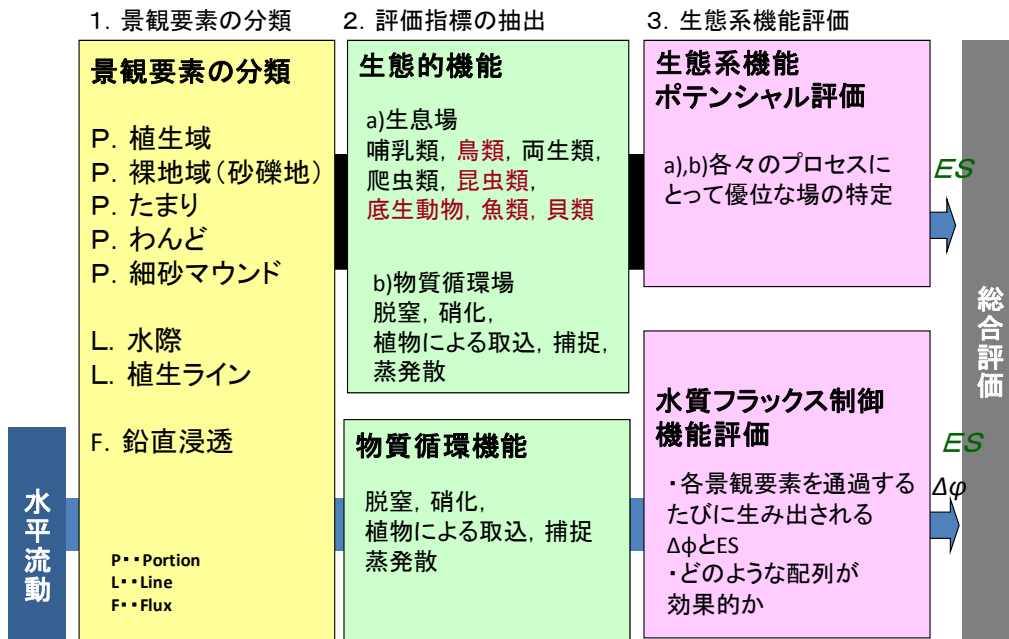


図-3.6 砂州景観の評価枠組み

### 第 3.5 節 結語

本章では、流域圏における河川景観の位置づけを行った。河川の骨格構造であるセグメントに着目し、その中でも特徴的な交互砂州区間を取り上げ、景観管理手法の枠組みを示した。

すなわち、砂床河川の交互砂州を有するセグメントを対象に、はじめに河川生態系を評価する上で重要となる「河川景観」や「河川生態系の構造と機能」、「生態系サービス」などの基本概念を、既往文献を踏まえながら整理を行ったうえで、本研究におけるそれらの捉え方を論じた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 河川景観とそれらを構成する要素は、様々な空間スケールの中に入れ子状に収まり、表流水や伏流水などのフラックスによって連結されたシステムを有している。
- 2) 河川生態系の構造は、物理基盤、生物相、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おり、生態系機能はそれらの相互作用により成り立つ。
- 3) 不均一かつ階層的な河川景観の中では、フラックスによる栄養塩動態や有機物のインプットの異なりが生物群集や生態系プロセスにまで影響を及ぼし、特徴的な景観ごとに異なる生態系機能を持つ。
- 4) 河川の栄養塩循環に着目すると、その素過程の大部分が「水質浄化サービス」に貢献する。
- 5) 伏流に伴う脱窒作用に着目すると、生態系機能の発現機構は、その場に潜在している特性（ポテンシャル型特性）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（フラックス型特性）という二つの側面に大別される。

さらに、既往の生態系機能評価手法を概観した後、上述した概念整理に基づいて、砂河川交互砂州形成区間の砂州景観評価手法の枠組みを構築した。次章からは、このような砂州景観評価の枠組みの中で、最も重要な本章で示した二つの側面、すなわちポテンシャル型特性とフラックス型特性のそれぞれの生態系機能評価について、二河川での過去の研究成果に基づいて検討していく。

## 参考文献

- 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.
- 尾花まき子, 安佛かおり, 辻本哲郎: 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, 河川技術論文集, Vol.16, pp.471-476, 2010.
- 片貝武史: 表層景観に着目した木津川砂州における水・物質輸送特性に関する研究, 名古屋大学博士論文, p.136, 2009.
- 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.
- 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.
- 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, pp.122, 2008.
- 山本晃一: 沖積河川学, 山海堂, pp.490, 1994.
- 国土交通省河川局: 淀川水系河川整備基本方針, 2007
- Adamus, P.R. and L.T. Stockwell: A method of wetland functional assessment; Vol.I, FHWA-IP-82-24; Vol.II, FHWA-IP-82-84, Federal highway administration, Washington, D.C., 1983
- Frissell, C.A., W.J. Liss, C.E. Warren and M.D. Hurley: A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context, *Env. Manage.*, Vol.10, pp.199-214, 1986.
- 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.
- Poole, G.C.: Fluvial landscape ecology addressing uniqueness within the river discontinuum, *Freshwater Biology*, Vol.47, pp.641-660, 2002.
- Rees, William E.: Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out, *Environment and Urbanization* 4, pp.121-130, 1992.
- 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.
- Stalnaker, C., L.L. Berton, J. Henriken, K. Bovee and J. Barthlow: The instream flow incremental methodology; A primer for IFIM, National Ecology Research Center, National Biological Survey, 1994.

Tsujimoto, T. : Structure and function of river ecosystem-approach from ecohydraulics-, , Proc. 8th International IAHR Symposium on Ecohydraulics, Seoul, Korea, CD-ROM, 2010.

U.S. Fish and Wildlife Service : Habitat Evaluation Procedure (HEP), U.S. Dept. of Interior, Fish and Wildlife Service, Ecological Service Manual 101, 102 and 103, pp. 368, 1980.

Wu, J. and O. L. Loucks: From balance-of-nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *Quarterly Review of Biology* 70, pp. 439-466, 1995.



## 第4章 河川景観解析手法を用いた生態系機能ポテンシャル評価

### 第4.1節 概説

ここでは、第3章で述べた河川の砂州景観評価の枠組みの中における、生態系機能の二つの側面（ポテンシャル型特性とフラックス型特性）のうちのポテンシャル型特性を持つ生態系機能に着目する。生態系機能のポテンシャルは、視覚的な景観である物理基盤特性との相関が大きいとされることから、GIS（地理情報システム）を用いた景観解析手法によって、その定量化を試みる。

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（中村ら、2003）。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、個別的な調査研究は多数実施され、数々の知見がもたらされてきたが、それらを統括して生態系としての環境を議論することの難しさにあるといえる。

本章では、こうした背景に鑑み、とくに砂州を伴う砂河川でしばしば河川環境管理目標とされる「砂州景観の保全」をとりあげる。その具体的施策を明確にするためには、どの砂州のどの部分が河川生態系として重要な機能を有しているのかを明確にする必要がある。生態系としての重要性を判断する鍵として、典型性で代表される生物種に提供される生息場と、生態系を支え生態系サービスの基本となる物質循環で重要な役割を果たしている場がある（尾花ら、2008）。また、辻本ら（2008）によって、砂州を形成している景観要素ごとに生態的機能の大きさが異なっていることが明らかになっている。さらに、個々の特徴的な景観とそこで発揮される機能を関連付けたのち、砂州スケールでさらにはセグメントでそれらを統合的に取り扱うことによって、区間全体としての河川の機能を示すアプローチを、特に砂河川の交互砂州形成区間において、提案してきた（尾花ら、2008）。

その延長の中で本章では、多数の知見が蓄積されている淀川水系木津川を対象として、複数の典型性からの注目種の生息適性、有機物や無機物の捕捉、硝化や脱窒の卓越性など、生態的機能のレベル分類をおこなう。さらに、各生態的機能の砂州別の相違および河道内砂州での経年変化を調べることによって、砂州河川での保全優先度の高い砂州や経年変化の中で劣化している機能の把握による修復の必要性等の保全戦略について検討する。

## 第 4.2 節 研究対象地の概要

本章で事例として扱う対象は、淀川水系木津川である。木津川は、三重県西部に位置する布引山地を源に発し、上野盆地において柘植川、服部川などの支川を合流し、岩倉峡を西へ流れ、笠置、加茂の山地部を経て流れを北に変え、山城盆地を貫流し、八幡において宇治川および桂川と合流し、淀川に注ぐ（図-4.1）。

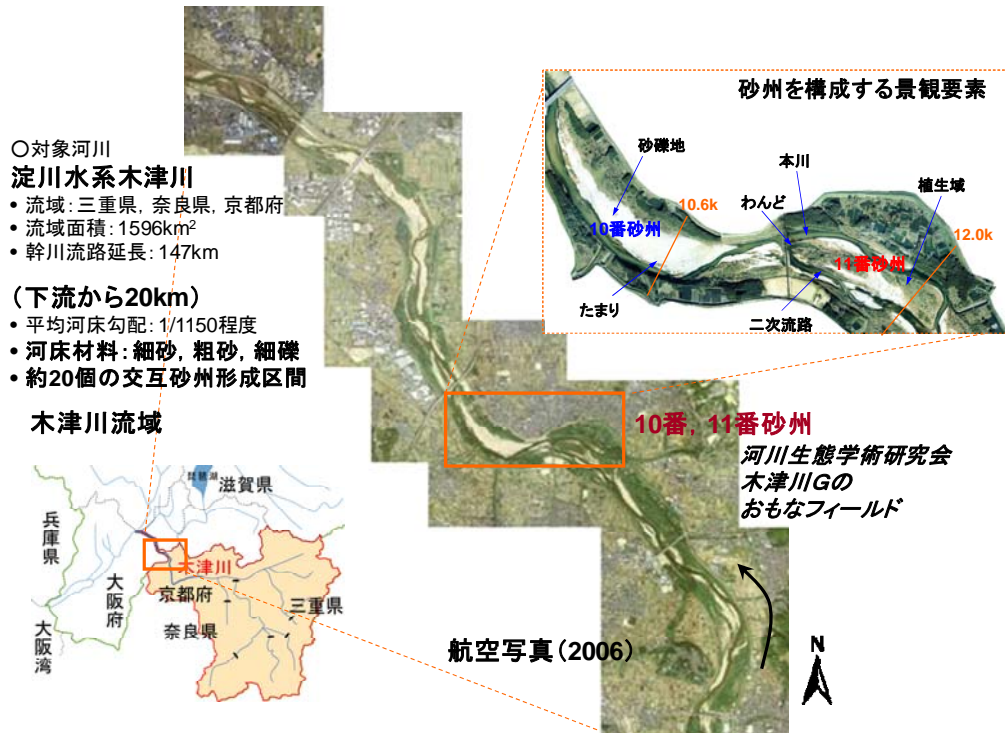


図-4.1 木津川流域図と対象区間

流域は、三重県、奈良県と京都府の一府二県にまたがり、流域面積は約 1596km<sup>2</sup>、幹線流路延長約 147km の 1 級河川である。木津川を含む淀川水系は近畿圏の中心を貫き、関西地方の生活を支えている重要な水系である。木津川流域の大半は山地部で占められ、地質は風化花崗岩が広く分布しており、流送土砂量が多く、日本有数の砂河川として特徴づけられる。そのような流域の特性から、治水や利水対策に関する事業が上流域で行われ、明治 11 年からの直轄砂防事業や高山ダム、青蓮寺ダム、室生ダムをはじめとするダム群が建設され、現在も洪水調節や関西圏への水供給を担っている。また、下流域は豊富な土砂供給を受け、1960 年半ばから 1971 年まで活発な砂利採取が行われていた。

研究対象区間は、木津川下流域の淀川三川合流点より上流に 20km の区間で、平均河床勾配が 1/1150 程度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 18 個



の砂州を有する交互砂州形成区間である。16番砂州より上流は、1970年代前半のダム建設による土砂供給の減少により、また4番砂州から下流は淀川本川の河道掘削による河床低下（図-4.2）の影響により、砂州の高水敷化による植生の繁茂・樹林化が進行している。そのため、この上下流の区間を除いた5番砂州～15番砂州（三川合流点から4.4～16.2km）（図-4.1写真）を研究とした。この区間での計画高水流量は加茂地点において $6100\text{m}^3/\text{s}$ と定められており、図-4.3を見ると、1970年前後のダム建設以前は、 $4000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水が度々発生していたが、建設後30年間の年平均最大流量は $1800\text{m}^3/\text{s}$ となっている（辻本ら、2002）。

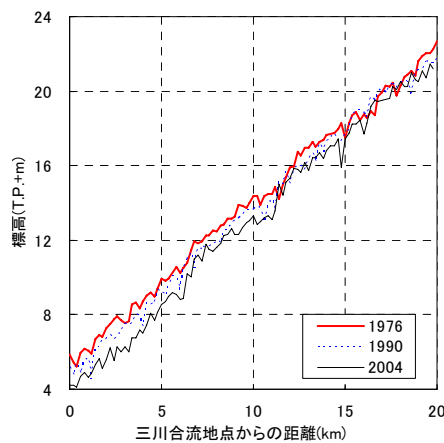


図-4.2 河床縦断の変遷

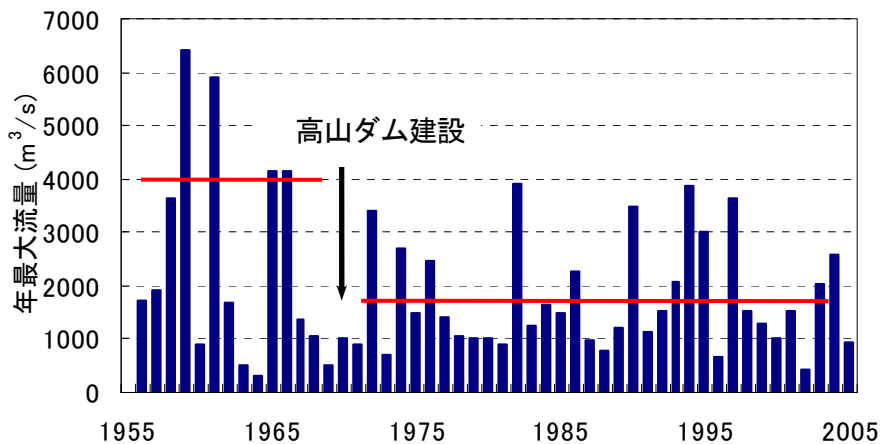


図-4.3 年最大流量

#### 第 4.3 節 研究対象地における河川生態学術研究

木津川の交互砂州形成区間では、この場をフィールドとして、河川水理学や地下水文学、陸水学、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河川生態学術研究木津川グループが、1998年から約10年にわたり数々の調査研究を蓄積してきた。河道・砂州動態などの物

理基盤に関して、交互砂州を有する骨格構造レベルでの景観変遷に大きな役割を果たしているのは植生動態で、とくに草本植生の侵入や草本から木本への遷移に洪水履歴が大きく関与していることが示された(寺本ら, 2004)。さらに植生動態をキーとした砂州の微地形形成に関する研究が進められ、砂州表層の粒度分布と植生の繁茂状況には相関があり、それらが分級を引き起こしている(辻本ら, 2002) ことや水際に生育した植生域の発達過程と地形変化の対応関係(鷲見ら, 2000) などが見出された。生息場に関しては、砂礫地に生息する生物として代表的なチドリ(山岸ら, 2003), アリジゴク(松良ら, 2004) の生態のほか、わんどやたまりに生息する魚類, 植生上に生息する昆虫・鳥類についても明らかにされている。物質循環に関しては、流路河床における脱窒特性(中島, 2003), 水平伏流流動・鉛直浸透に伴う水質変化(片貝ら, 2006), たまりの栄養塩動態(安佛ら, 2005) などが明らかにされている。また、洪水規模による砂州の景観要素での物質の捕捉・流出現象における役割が異なることが明らかにされている(辻本ら, 2008)。

河川景観と河川生態系の構造と機能に基づいて、これらの調査研究を整理してみると、ある特徴的な場に応じて生物の生息適性や物質の捕捉、硝化や脱窒などの卓越性が異なることが見てとれる(図-4.4 参照)。このように、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機能を、物理基盤が有する「生態的機能」と定義している(尾花ら, 2008)。前章でも述べたように、砂州景観は、さらに細かなスケールの景観要素の集合によって構成されており、陸域では裸地域, 植生域, 水域では本川, 二次流路, 一時水域などに分類できる。さらに、生態的機能との関連では、洪水規模と比高の高さに応じた砂州の冠水によっても、各景観要素が利用されている特性は異なりを見せることが分かる。

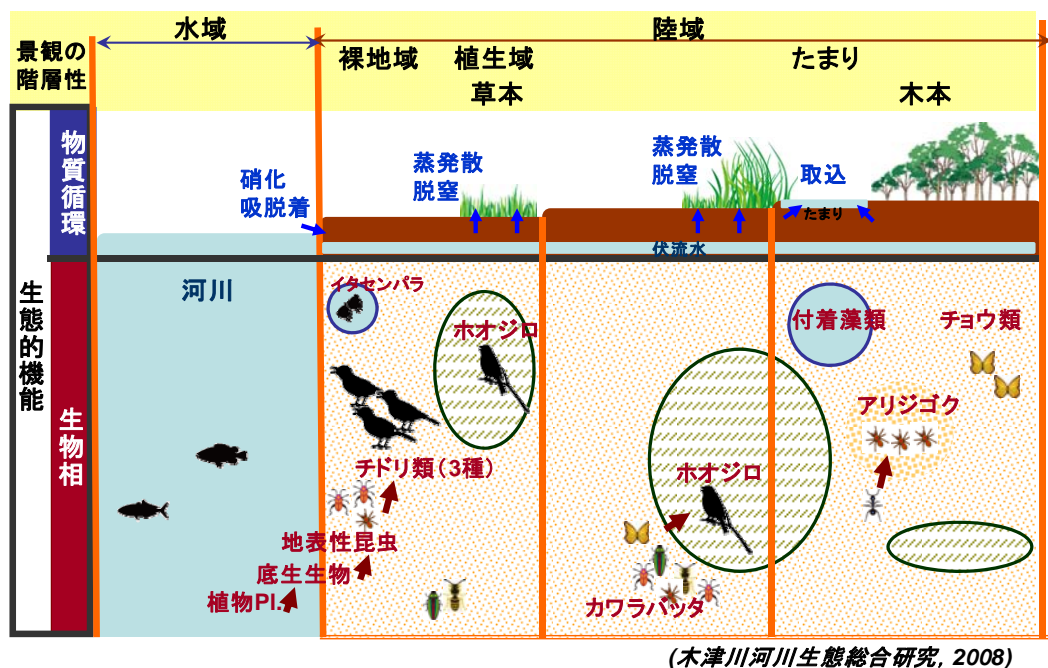


図-4.4 砂州の景観要素と生態的機能との関係

#### 第 4.4 節 冠水頻度解析による物理基盤特性の把握

前節において、砂州のさまざまな景観要素と生態的機能には密接な繋がりがあることが明らかになり、それらは特に、洪水規模による比高の変化に応じた砂州の冠水域ごとに異なるようである。河川環境管理の視点では、こうした生態系の機能が十分発揮できるような空間管理が必要といえる。そのために、まずどの場でどの機能が発揮されているのかを定量するために、生態的機能に基づいた場の分類が必要となる。そこで本節では、砂州の冠水域の分類指標として、生態的機能が発揮される鍵となる植生域に着目し、特に生物の生息に選好性を有する植物種に基づいた物理基盤特性（粒径、比高、植生種や冠水頻度）の把握を試みる。植物自体も物理基盤がもつ生態的機能の一つであるが、ここでは植物の生息場も物理基盤指標の一つとすることにする。

河道内植物の生息適性については、種々の研究が行われており、辻本ら（1993）は植物群落の形成は河道によって異なるものの、比高分布、横断勾配、局所的縦断勾配、河床材料や流況および流量変化に対する比高の変化特性などを考慮すればある程度普遍的な性質が抽出できるとしている。また、有田（1998）も植物の生息適性に関連するものとして表層土壌の粒径と冠水頻度の重要性を指摘している。

木津川における植物種と表層土壌の粒径の関係については原田ら（2003）が調査を行っている（図-4.5 参照）。しかしながら、対象河川における植物種と冠水頻度の関係についてはまだ明らかにされていないため、それらの関係に基づいて景観を分類し、物理基盤条件の整理を行う。

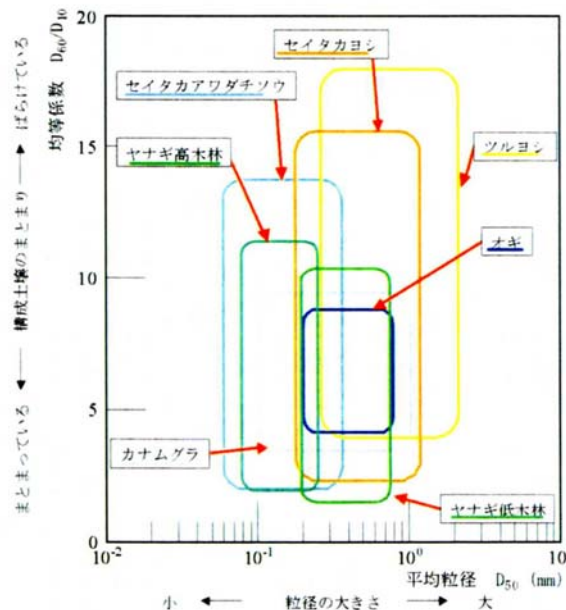


図-4.5 木津川の植物と土壌粒径の関係（原田ら，2003）

#### 4.4.1. 手法

はじめに、流量による比高の変化特性を求めるために冠水流量コンターを作成する。ここでの冠水流量とは、ある地点の標高が冠水する流量と定義する。次に、植生分布図を作成し、冠水流量と植生の生息適性の関連付けを行った後（冠水頻度解析）、木津川の流況を考慮して区分する冠水流量を決定する。流量に応じて冠水するエリア（冠水帯）が決まるため、各冠水帯での土壌粒径調査結果を参考に、粒径分布特性や比高などの物理基盤特性を把握する。解析にあたり、使用したデータの一覧を表-4.1示す。

また、以下に解析に用いたツールを示す。

- ・ 地理情報システム（Geographic Information Systems:GIS）  
     : ESRI 社製 ArcMap9.2 および ArcCatalog9.2 （以下 GIS）
- ・ 画像編集ソフトウェア：Adobe Photoshop CS2 （以下 Photoshop）
- ・ 河道計画シミュレータ：(財) 国土技術研究センター製  
     河道横断測量データを基に、河川構造物、植生群の影響を考慮した、準2次元不等流計算により水位や水深、断面流速、最深河床高などの計算が可能である。また、流下能力計算や河床変動計算も可能である。

表-4.1 使用データ一覧

	1998年	2002年	2004年	2007年
植生分布図	2/28	9/2~13	—	—
横断測量データ	不明	5/18~6/25	9/16	2/6~3/3
水位・流量データ	国土交通省水文水質データベース 八幡水位・流量観測所：合流点より1.2km 飯岡水位・流量観測所：合流点より16.4km ※2006年以降流量の登録が無いため、2007年は2005年のデータを代用			
表層土壌データ	8/6~12 立命館大学 水工研究室	—	10/13 11/4 05年4/22	06年12/18 6/2 7/31

##### (1) 冠水流量コンターの作成

まず、横断測量（標高）データから冠水流量データを作成する。河道計画シミュレータを用いた準二次元不等流解析に、数パターンの流量と下流端水深を与え、得られた流量水位データから各測量断面において水位流量曲線を作成する。ここで用いたデータ（流量、下流端水深）は次のように設定した。流量は、飯岡観測所の1995~2005年の日流量から洪水解析を行い、洪水頻度に沿った形で設定した（図-4.6）。その流量に対応する下流端水位は、八幡観測所の1998

年・2002年の日水位・流量データから水位流量曲線を作成し、算出した。水位流量曲線は、式(4.1)を変形した式(4.2)を用いた。その水位流量曲線を用い、横断測量データから冠水流量を算出した。さらに、測量断面200mピッチの冠水流量データを50mピッチに補間し、流量コンターを描画した(図-4.7参照)。

$$Q = a(H - b)^2 \quad (4.1)$$

$$H = a\sqrt{Q} + b \quad (4.2)$$

ここで、 $Q$ は流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $H$ は水位 (m) である。

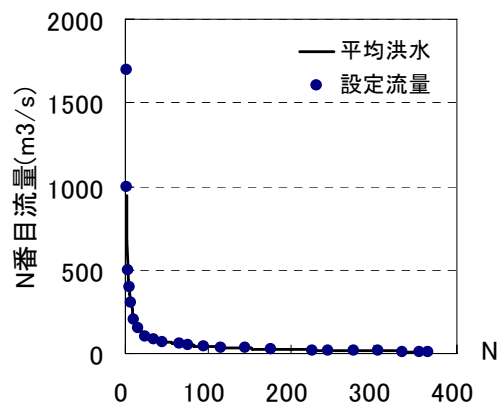


図-4.6 1995-2005年の平均洪水

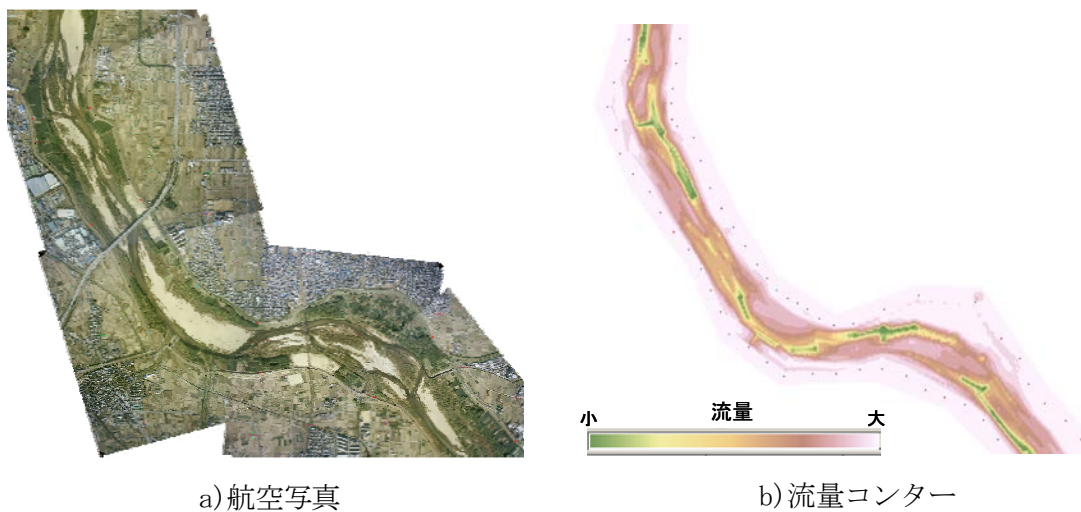
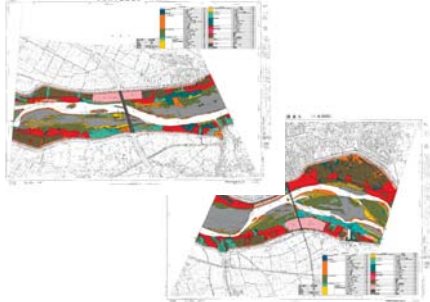

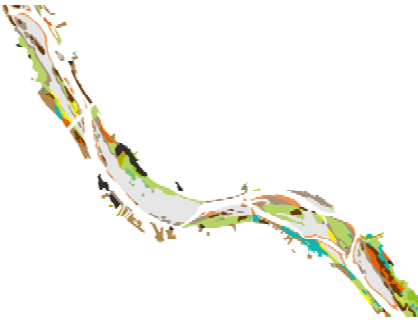



図-4.7 冠水流量コンター

## (2) 植生分布図の作成

各河川事務所が保持している植生分布図は、主に紙ベースのものかPDF形式で存在する。それらを、GIS解析に用いるための画像処理および図化手順を以下の表-4.2に示す。

表-4.2 植生分布図の作成手順

	作業（ツール）	作業結果（画像の状態）
①	PDF形式植生分布図 (Photoshop)	
②	対象区間全7枚の①を、1枚の図に結合する。 (Photoshop)	
③	植物種ごとに塗り分ける。 (Photoshop)	
④	画像に座標を与え、数値地図化したのち、図形に変換する。(GIS)  ※画像(ラスターデータ)が、図形の集合(ベクターデータ)に変換され、面積や周長の計算が可能になる他、その他の情報を属性として与えることも可能になる。	

### (3) 冠水頻度解析

ここでの冠水頻度解析とは、植物群落と冠水頻度の関係を解析することである。前節で作成した冠水流量コンター図と植生分布図を、GIS上で2つのレイヤに、5mピッチで作成したポイントレイヤを重ねあわせ、ポイントに重なる位置の植物種と冠水流量データを得た(図-4.8参照)。メッシュを用いると、1つのメッシュに複数の植物種が含まれ、計算が煩雑になるためポイントを用いた。

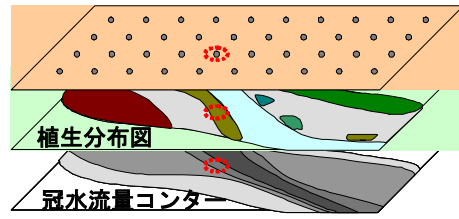


図-4.8 重ね合わせイメージ図

冠水頻度解析を、2カ年分(1998年, 2002年)行った各植物種の流量ヒストグラムを図-4.9に示す。

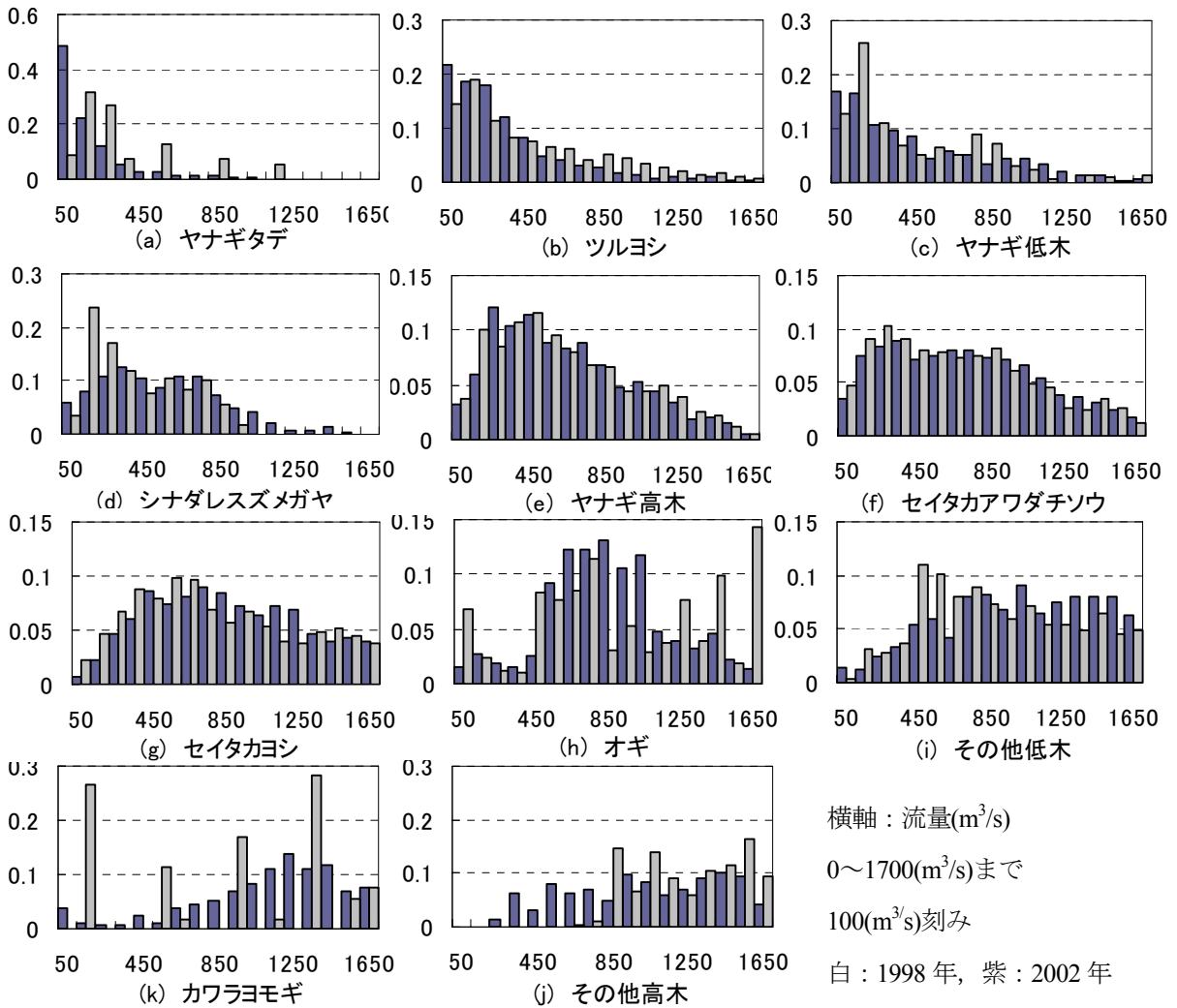


図-4.9 植物群落と冠水流量ヒストグラム(1998,2002年)

結果を見ると、植物種にはそれぞれ選好する冠水流量があり、さらに植物種によってそれが異なっていることが分かる。ヤナギタデは特に小さい流量で分布が卓越していることが分かるため、水際部分を好む傾向を示している。これに対して、木本類は大きい流量での分布に偏っているため、比高が高いところに生息適性がある。また、シナダレスズメガヤやセイタカアワダチソウのように、全流量に対して平均的に度数が分散されているように、広範囲に及んで生息が可能な種も存在している。

2カ年で比較してみると、ほとんどの種で各年のヒストグラムが概ね一致しているといえる。しかし、ヤナギタデ・カワラヨモギは他の種に比べて、各年の度数分布に違いが見られる。ヤナギタデは、2002年の植生分布図では、主に砂州の水際線に沿ってライン上に分布しているが、1998年の植生分布図では、水際にほとんど分布していない(図-4.10 赤色部分)。河道区間全体をみても、分布範囲(生息量)が少なく、ひとつひとつのヤナギタデ群落の生息場が度数分布に大きく影響を与えるためと考えられる。また、ヤナギタデは10月から1月にかけての1次散布、1月から3月にかけての2次散布ののち、4月に発芽する(宮脇ら, 2006)。冬季の冠水で種子が着床し、春になり発芽し成長するが、年最大流量が $600\text{m}^3/\text{s}$ を超えると前年までに着床・発芽した植生が流出し定着が抑制される。2002年は植生分布調査時期(9月上旬)以前、7月に $400\text{m}^3/\text{s}$ の出水が発生しているが冬には大きな出水は発生していない。よって、冬季に着床した種子が定着し、夏の出水で流されることなく、成長し、水際にライン上にヤナギタデが繁茂したと推察できる。このように、種子の発芽・定着の過程での出水のタイミングによって、植物群落の形成状況は変化すると考えられるが、11種の冠水流量に対する選好性は概ね捉えているといえる。



a)1998年2月

b)2002年9月

図-4.10 ヤナギタデ繁茂状況比較(植生分布図)

以上の結果から、冠水流量に対する植物種の選好性をまとめた図を図-4.11に示す。図には70%カバーする生息範囲と95%カバーする生息範囲を示した。この結果から、植物の冠水流量選好性を4つに区分し、それぞれの流量で冠水するエリアを「(個別)冠水帯」と定義した。冠



水帯の区分流量は、木津川の流況に基づき、1700,1000,500,100 (m<sup>3</sup>/s)として、それぞれに高位、中位、低位、水際冠水帯と名付けた。上限流量である 1700(m<sup>3</sup>/s)は、1970～2005 年までの年最大時間流量の平均値を採用した。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 m<sup>3</sup>/s 程度である。

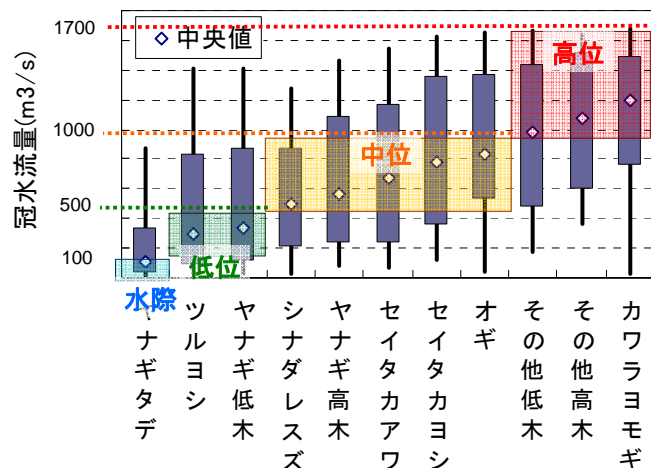


図-4.11 冠水流量と植物種の選好性

以上のように、砂州の領域を個別冠水帯に分類したことによって、そのエリアに優占する植物種を特定することはできた。しかし、植物種によって冠水帯に存在する割合は多様であり、その多様さが昆虫や鳥類といった生物生息適性を左右する。そこで、各冠水帯における植物種の優先割合を求めるために、まず各砂州における植物種ごとの面積率を求めた(図-4.12 参照)。対象 2 カ年における各砂州では、ツルヨシやセイタカアワダチソウの分布が目立つ。これを冠水帯ごとに算出したが、各砂州での植物面積率のパターンに特徴が見られなかったため、5～15 番全砂州の平均によって各冠水帯の植物種占有割合を算出した。結果を表-4.3 に示す。

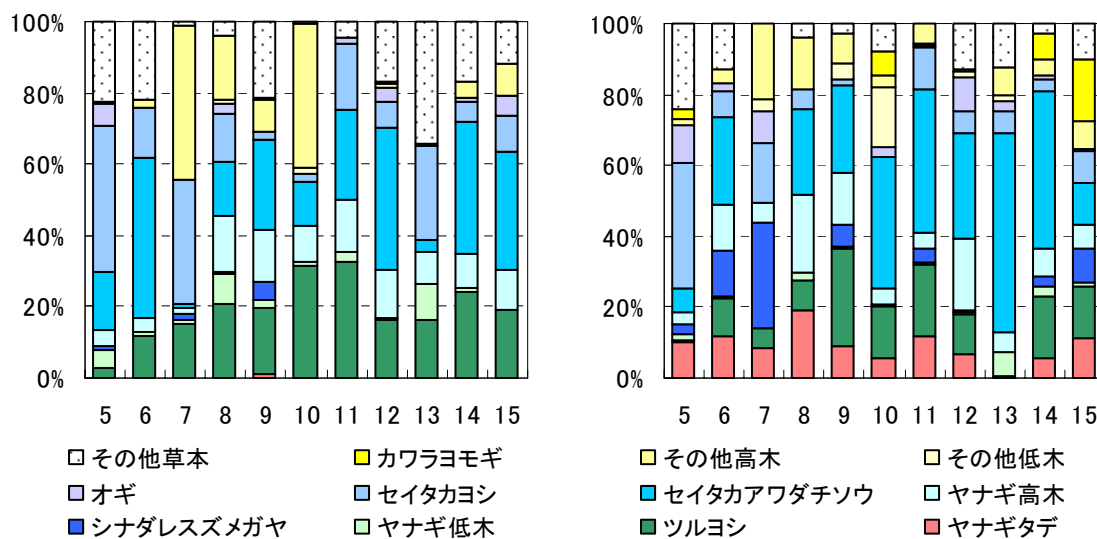


図-4.12 砂州植生域の植物種占有面積率

表-4.3 各冠水帯の植物種占有面積割合(%)

冠水帯		高位	中位	低位	水際
植 物 種	カワラヨモギ	3.8	0.9	0.2	0.7
	その他高木	12.3	12.6	4.3	1.5
	その他低木	4.7	1.4	0	0
	オギ	5.1	2.8	1.1	0.4
	セイタカヨシ	17.5	13.3	8.6	3.8
	セイタカアワダチソウ	33.3	33.7	23.0	9.3
	ヤナギ高木	8.0	11.8	13.5	7.6
	シナダレスズメガヤ	2.3	2.8	5.2	2.6
	ヤナギ低木	0.8	1.3	2.2	4.5
	ツルヨシ	7.1	7.5	28.3	30.5
	ヤナギタデ	0	0	2.4	29.9

(4) 裸地域の粒径分布特性

裸地域においても比高に応じた粒径分布に特徴があることが明らかになっている（辻本ら，2002・宮脇ら，2004）．著者らが対象砂州において現地調査を行った結果を用いて，前節で述べた土壌粒径データと冠水流量コンターを重ね合わせることによって，各冠水帯での代表粒径および均等係数を整理した．結果を図-4.13 に示す．

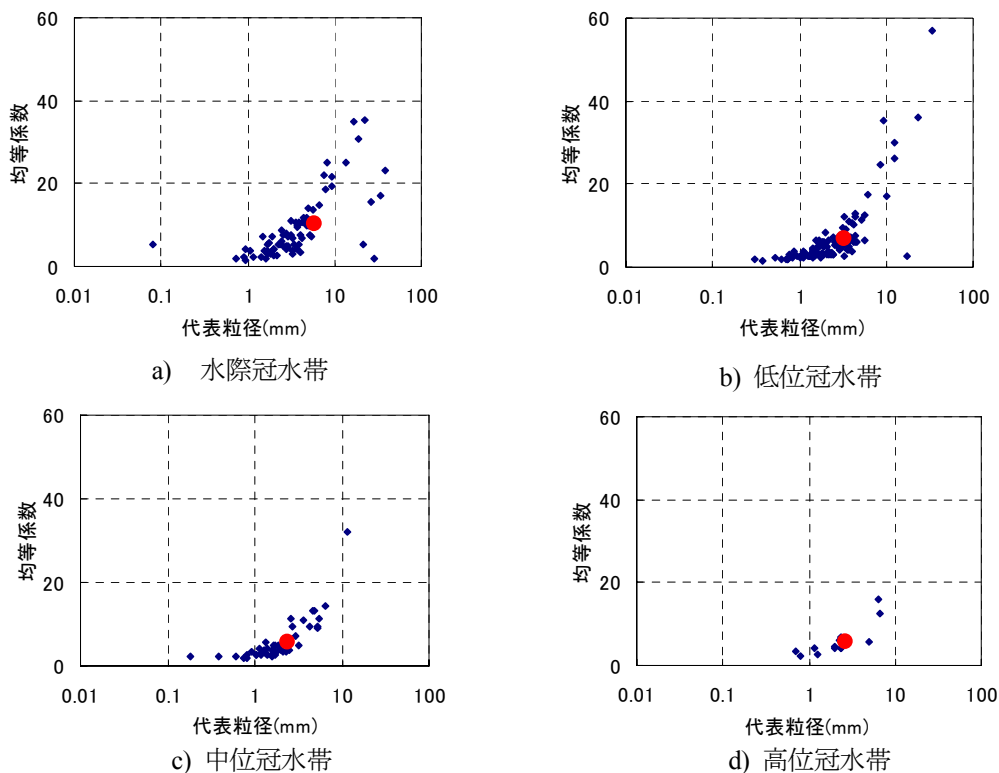


図-4.13 各冠水帯における粒径分布特性

#### 4.4.2. 結果

前節での検討によって得られた、砂州における景観分類とそれに対応した物理基盤指標（粒径、均等係数、冠水流量や比高）を表-4.4に示す。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、生態的機能の発現に大きく影響するため、これらを把握することは重要である。

以上から、航空写真、GIS解析および準二次元不等流解析を用いることによって、冠水流量に応じた植生分布特性を考慮した景観分類が可能となった。特に、冠水流量に基づいて植物種と粒径および比高の関連付けを行ったため、例えばセグメント特性が同様な他河川の物理基盤情報を得る際に、冠水日数に応じた代表的な流量を算定することが可能であれば、表-4.4に示したような植物種や粒径などの物理基盤指標を推測することが可能になったといえる。

表-4.4 各冠水帯における物理基盤特性

写真判読	景観分類			物理基盤			
	冠水帯	冠水流量 (m <sup>3</sup> /s) (冠水日数 (日/年))	植物種	代表粒径 (mm)	均等係数	冠水流量 (m <sup>3</sup> /s)	比高 (m)
植生域	高位	1700 (1/3-1/2)	カワラヨモギ	-	-	750-1500	2.79-3.76
			その他高木	-	-	600-1500	
			その他低木	-	-	460-1450	
	中位	1000 (1)	オギ	0.2-0.8	4.5-9	520-1360	1.82-2.79
			セイタカヨシ	0.2-1.2	2.2-15.5	350-1350	
			セイタカアワダチソウ	0.06-0.35	2-14	230-1170	
			ヤナギ高木	0.08-0.25	2-12	230-1090	
			シナダレスズメガヤ	-	-	200-880	
	低位	500 (3)	ヤナギ低木	0.2-0.8	1.5-10.5	100-875	0.53-1.82
			ツルヨシ	0.25-2.1	4-18	85-840	
水際	100 (30)	ヤナギタデ	-	-	25-330	0-0.53	
裸地域	高位	1700 (1/3-1/2)	-	0.81-6.42 (2.69)	2.55-12.58 (5.88)	1000-1700	2.79-3.76
	中位	1000 (1)	-	0.38-6.49 (2.40)	2.04-14.19 (5.83)	500-1000	1.82-2.79
	低位	500 (3)	-	0.62-12.4 (3.28)	2.00-30.03 (6.70)	100-500	0.53-1.82
	水際	100 (30)	-	0.92-29.05 (5.83)	2.07-35.0 (10.32)	25-100	0-0.53
たまり	-	-	-	-	-	-	-
わんど	-	-	-	-	-	-	-

## 第 4.5 節 景観解析手法による景観分類

これまでに提案されている景観解析手法（片貝ら，2007・辻本ら，2008）に，流況に応じた水位変動を砂州が冠水するエリア（冠水帯）として取り入れることによって，既往の手法に改良を施した．それを用いて，過去 6 カ年分と 2002 年における各砂州での景観要素分類図を作成し，対象河道区間における景観要素の時空間分布特性の把握を試みる．

### 4.5.1. 手法

対象区間の景観要素をより客観的に抽出するため，まず河道内の景観を人工区分（水路，耕作地，堤防や天端など）と河相区分（水域，裸地域，植生域）に分類し，整理を行った．特に本章では，生態的機能が発揮される場に注目しているため，その分類の中でも機能の発揮を期待できる河相区分のみを抽出し，人工的な空間は排除した．航空写真による画像解析については，片貝ら（2007）の手法を用いて行い，さらに定期横断測量データを用いた準二次元不等流解析により算出した水位を重ね合わせ，異なる生態的機能を有する領域との境界条件となる洪水規模別の冠水域に着目して細分類し，**図-4.14** に示すように景観要素を標準的に図化した．ここで，準二次元不等流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，前節で決定した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( $Q=1700, 1000, 500, 100\text{m}^3/\text{s}$ )とした．以上のような手順（**表-4.5** 参照）で，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．過去 6 カ年の景観分類図作成にあたり使用したデータの概要をに示す．

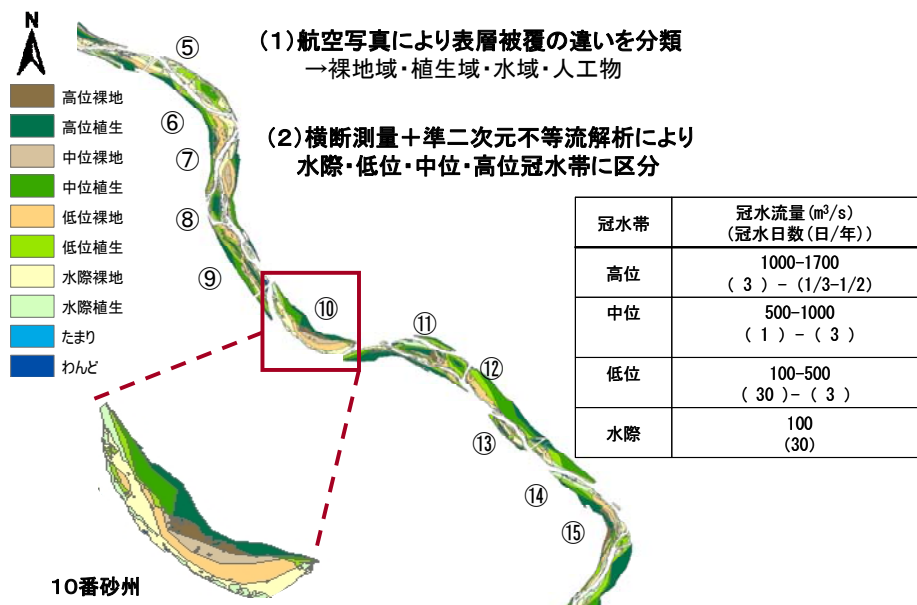


図-4.14 対象区間における景観要素分類

表-4.5 景観要素分類図作成手法





手順	作業内容	
① 写真の数値地図化	航空写真に座標を与え数値地図化。  ※画像データの場合は圧縮などしないでそのまま使用。写真、コピー等はスキャン時に出力解像度を 300dpi に統一。座標を与える際は歪み誤差を 10m 以内に。	
② 砂州域の決定	河道計画シミュレータで $1700\text{m}^3/\text{s}$ の冠水位を算出する。冠水位から冠水地点を求め、航空写真上にプロットし、砂州域を囲む。  ※ $1700\text{m}^3/\text{s}$ : 1995~2005 年の飯岡観測所の年最大時間流量を平均したもの	
③ 航空写真を用いた景観分類	砂州域内を目視で分類する。 ・ 植生域 ・ 裸地域 ・ 水域 (たまり・わんど)  ※流路 (本流, 一時流路) は対象外とする。	
④ 冠水頻度分析に基づいた景観分類	②同様、冠水帯の区分流量から冠水位を算出し、冠水地点をプロット。それをつないだ点が冠水帯の境界となる。その境界を③に重ね合わせる。 ・ 高位冠水帯 ・ 中位冠水帯 ・ 低位冠水帯 ・ 水際冠水帯	

表-4.6 使用データの概要

表示年度	航空写真 撮影日	横断測量データ 測量日
1974	1974. 3. 4	1976. 不明
1979	1979. 11. 15	1980. 不明
1990	1990. 不明	1990. 不明
1997	1997. 不明	1998. 不明
2002	2002. 11. 29	2002. 6. 25
2006	2006. 11. 3	2007. 3. 3

#### 4.5.2. 結果

景観要素分類図が作成できると、GIS 解析を用いて景観に関わる諸量（面積，周長や水際長など）の算出が可能となる。区間内砂州の空間分布特性と時間分布特性の結果を，**図-4.15** と **図-4.16** に示す。

結果を概観すると、2002 年における景観要素の空間分布特性は、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を示している。また、どの砂州も裸地域は水際・低位冠水帯の割合が高く、植生域は中位・高位冠水帯に占める割合が高い。攪乱が頻繁にある比高が低い場合は、植生の侵入・定着を妨げているためと考えられる。たまりやわんどが砂州の面積の中に占める割合は低いが、6,7 番砂州以外には形成されていることが分かる。

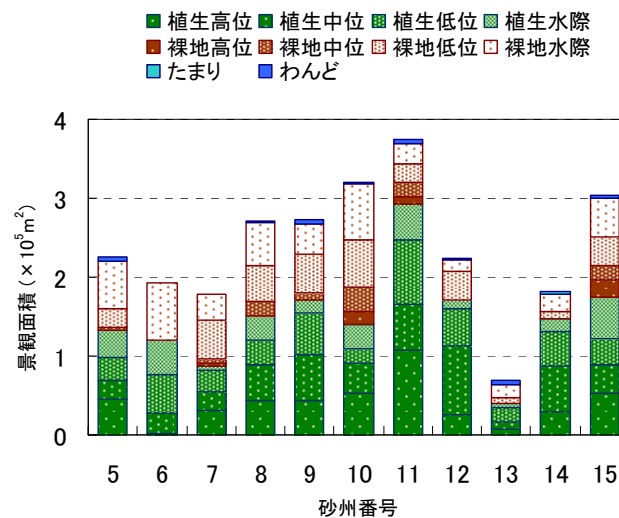


図-4.15 区間内砂州における景観要素の空間分布（2002年）

次に、景観要素の変遷を見ると、過去 30 年間のうちに、水際・低位冠水帯は約 20%減少しているのに対して、中位・高位冠水帯は増加傾向である。対象区間の設定の際に、河床低下の影響などで既に砂州が高水敷化した砂州は除いているにもかかわらず、対象区間である砂州においても緩やかに高水敷化が進行していることが推察できる。さらに、ここ 30 年のうちで植生域の占有割合の 2 倍以上の増加が確認でき、特にそれは中位・高位冠水帯で顕著である。これは、植生域が洪水に運搬される細砂の捕捉により比高が高くなるうえ掃流力は弱まり、攪乱頻度の減少は植生の侵入・拡大を許し、さらにそこに土砂が堆積するという繰り返りから、比高が高いところでの植生域の拡大が進んでいると予測される。

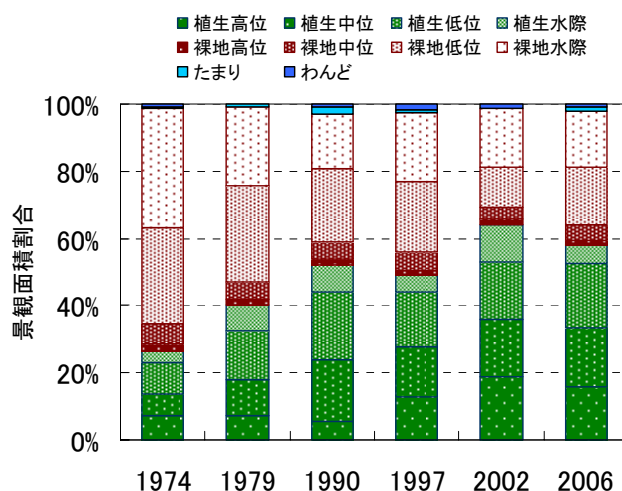


図-4.16 区間内砂州における景観要素の変遷

#### 4.5.3. まとめ

以上のように、航空写真、横断測量データや流況データという簡単に入手できる情報を用いて、景観分類図を作成することにより、河道を構成している様々な景観要素の時空間分布特性を定量的に把握する手法を構築した。河川環境管理において、河道の変遷を知ることは重要であるが、過去を再現する情報は限られている。本手法は、他河川においても上述した 3 種類のデータを用いて河川景観および変遷を定量できるため、河川環境管理において有用な手法であるといえる。

### 第 4.6 節 砂州の生態的機能ポテンシャル評価

河川のさまざまな景観要素に応じて特徴的な生物群集が形成され、物質循環の素過程が発揮される。上述した景観解析手法により、生態的機能の発現場を意識した景観分類を提案してきた。本節では、研究対象区間での各々の生態的機能についての蓄積された研究成果から、各景観要素の生物種の生息適性や物質循環の素過程の生起場としての適性をレベル分類し、それらを景観と関連付けて、河川環境を定量化することを試みる。

#### 4.6.1. 手法

木津川研究グループで蓄積された調査研究の結果(河川生態学術研究会木津川研究グループ, 2008)を用いて, 特徴的な場(景観)を利用する生態的機能を, 河川環境を測る指標として抽出する. ①生物の生息適性と②物質循環の素過程の卓越性は, 景観要素の違いによって適性が異なるため, 5段階(A=1, B=0.75, C=0.5, D=0.25, E=0)に分類した機能値を $\gamma_i$ として定量化し, その一覧をこれまでの研究成果をもとに概略作成した. 次節に, 指標として抽出した機能と各々の評価基準を示す(表-4.7 参照). その評価基準に基づいて, 各景観要素に機能値を与えた(表-4.8 参照).

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生物の生息場や物質循環の素過程の生起場を特定し, 各々に対して機能値を5段階で与えている. これによって, 景観と機能のレベル分類が可能になったため, 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  $A_i$ , 各景観要素の生態的機能値を  $\gamma_i$  (0~1) とするとき, 各砂州の生態的機能は, 次式で定義される WUA (Weighted Usable Area) で定量化される.

$$WUA = \sum_i A_i \gamma_i \quad (4.3)$$

これは生息場評価における PHABSIM (Physical Habitat Simulation) (Milhous *et al*, 1989) の援用である. こうした定量化を通じ, 生物群集, 物質循環過程で研究されて得られた知見が, 生態系機能指標として物理景観要素と関連付けられ, こうした物理基盤の形成・維持・更新機構に基づいて管理される.

#### 4.6.2. 指標の設定

本研究で取り扱う生態的機能の評価指標とその評価値(機能値)の想定根拠を以下に示す. 現時点での研究成果に基づいて評価指標や評価値を設定したため, それらの精度やその整合性向上は今後の課題である.

##### (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が調査がなされており, また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. 本研究では, 鳥類を頂点とした食物網に着目した種と木津川砂州の典型種・希少種を生態的機能として抽出した.



#### a) 鳥類

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（2003）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、巣目前の水際約 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（山岸ら、2009）。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、水際冠水帯裸地域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（2009）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まることが推測できる。以上のことから、水際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。このように整理された情報をもとにチドリ類とホオジロに対して作成した評価基準が表-4.7 に示される。

#### b) 昆虫一般

木津川での生息が確認されている陸上昆虫の種は多数であるが、本研究では木津川生態学術研究の昆虫研究グループが砂州の各景観要素で確認した（遠藤ら、2009・桜谷、2003）種を整理した後、生物多様性の視点から生息する種数が多いほど高い機能値を与えた。

#### c) 昆虫（アリジゴク）

クロスバカゲロウの幼虫あるアリジゴクは、さらさらした砂地にすり鉢のような窪みを作り、その底部に生息する。アリジゴクは、木津川砂州においても比高の高い裸地域で生息し、特に植生背後の細砂の堆積するマウンド上で多く確認された。1mm 以下の砂が 60%以上の砂地で生息が確認されており、特に 1mm 以下の砂が 80%以上の場を選好するようである（松良、2009）。以上から、裸地域の粒径が細かいほど高い機能値を与えた。

#### d) 昆虫（カワラバッタ）

京都府のレッドデータブックで絶滅寸前種に指定されており、木津川で生息が確認されたことは関西では特に貴重といえるため、砂州の生態的機能のひとつとして抽出した。成虫は、冠水頻度が高く草本が散在しているだけの砂地での生息が多く確認された（遠藤ら、2009）とい

う情報によった。

#### e) 底生動物

底生動物とは、水域に生息する生物の中でも底質に生息する生物の総称で、ここでは、カゲロウ、カワゲラ、トビケラ、ユスリカ、ダニ、ミジンコを対象種とした。各景観でそれらが確認された場（谷田ら、2009）に高い機能値を与えた。本来、底生生物は水域の環境に依存するものであるが、今回の研究では水域の生態的特徴を十分把握できる景観分類になっていないので、ここでは総括的な扱いとなっている。

#### f) 魚類・貝類

木津川では、オイカワ、カワヨシノボリなどの生活史との関連(各ステージの餌や捕食)での調査結果が蓄積された（福原ら、2009）が、本研究では、景観要素分類の中に本流を含んでいないため、たまりとわんどの有無を機能の有無と置き換えた。

### (2) 物質循環の素過程の生起場

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。特に本研究では、既往の研究にもとづいて、異なる景観要素における活性の相違が想定できる生元素の捕捉および硝化・脱窒といった素過程をとりあげた。これらは、生元素のさまざまな容態での輸送・変化過程を支える生態的機能である。

#### a) 脱窒

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る。微生物による脱窒作用は、脱窒菌の存在と、河川水からの窒素化合物の供給が必要である。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。片貝ら（2006）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。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（Anbutsu *et al.*, 2006）。つまり、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（中島, 2003）。これにもとづいて機能値を想定した（今回、わんどでは調査が行われていないため機能値を与えなかった）。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（Shade *et al.*, 2001）。そして、植物による伏流水の吸い上げもその活性の一部を受け持つため、伏流水面からの距離が小さいほど高い機能値を与えた（表-4.7 参照）。

## b) 硝化

硝化とは、微生物の作用によってアンモニア態窒素から亜硝酸態窒素や硝酸態窒素を生じる物質変化過程である。木津川では植生域・裸地域の水際域や、わんど・たまり域においてその作用が確認されている(中島ら, 2003)。水中や水際に生息する微生物によって硝化が起こるが、河川水中からのアンモニアの供給がないとこの作用は生じえない。そのため水交換の少ないたまりでは、わんどや水際に比べて低い機能値を与えた。

## c) 植物による取込 (同化)

植物は、栄養塩を根から体内に取り込み、同化代謝することで水質浄化に寄与する。そのため、根からの河川水の取り込みが不可欠であるが、木津川の植生域では細粒成分捕捉堆積の影響から植生域の下層に難透水層が存在する(鷺見ら, 2003)ため、それが植物の吸い上げを阻害すると考えられる。そのため、植生域から伏流水面への距離が小さいほど活性が高い(かせ澤ら, 2006)ことも勘案して機能値を与えた。

## d) 捕捉

捕捉とは、植生や表層の土壌が河川の流れによって運ばれる栄養塩や有機物をトラップすることをいう。表層での物質の捕捉には、鉛直浸透が大きな影響を与える(かせ澤ら, 2006)。さらに、砂州表層の生元素の貯留に関する研究(辻本ら, 2008)によって景観要素における捕捉機能の差異が明らかにされている。こうした点を考慮した機能値の想定を行った。

表-4.7 生息場、物質循環素過程生起場適正定量化の例

生物	チドリ	ホオジロ		昆虫	アリジゴク	カワラバッタ	底生生物、魚貝類
指標	営巣場～採餌場の距離	植生域(営巣場)の有無	植生域エッジ(採餌場)長さ	生息種数	裸地域(営巣場)の粒径	生息個体数	水域(生息場)の有無
A	近い	シナダレスズメガヤ ノイバラ	長い	30 >	細	多い	たまり わんど
B	↑ ↓	草本	↓	30~20	↑ ↓	↑ ↓	-
C		水際植生域		20~10			-
D		木本	短い	10 <	粗	少ない	-
E	遠い	裸地域	裸地域	0	裸地域	0	陸域

	物質循環	脱窒	硝化	植物による取込	捕捉
指標	伏流水面からの高さ	河川水供給の有無	伏流水面からの高さ	物質含有濃度	
A	高	有	高	高	
B	↑	↑	↑	↑	
C	↓	↓	↓	↓	
D	↓	↓	低	↓	
E	低	無	裸地域	低	

評価値 (A:1pts, B: 0.75, C: 0.5, D:0.25, E:0)

表-4.8 各景観要素における生態的機能値

景観分類			生態的機能													
写真判読	冠水帯	植物種	生息場							物質循環場						
			チドリ	ホオジロ	昆虫	アリジゴク	カワラバッタ	底生動物	魚類	貝類	脱窒	硝化	植物による取込	捕捉		
植生域	高位	カワラヨモギ		B	B								D	E	D	B
		その他高木		D	B											
		その他低木		A	A											
	中位	オギ			B	D										
		セイタカヨシ			B	D										
		セイタカアワダチソウ	E		B	B	E	E	E	E	E	E	C	E	C	B
		ヤナギ高木			D	A										
		シナダレスズメガヤ			A	D										
	低位	ヤナギ低木			D	C							B	E	B	C
		ツルヨシ			B	D										
	水際	ヤナギタデ			C	D							A	A	A	A
	裸地域	高位	-	C		B	A	C	E				E	E		E
中位		-	B		B	B	C	E				E	E		E	
低位		-	A		C	C	C	E		E		E	E		C	
水際		-	D		A	D	A	A				A	A		C	
たまり	-	-		C				A	A	A	A	A	C		E	
わんど	-	-	E	E	D	E	E	A	A	A	A	E	A		E	

機能値 (A=1, B=0.75, C=0.5, D=0.25, E=0)

#### 4.6.3. 結果と考察

各砂州が有する生態的機能の空間分布を図-4.17に示した。さらに、13番砂州における過去6カ年の生態的機能の変遷を図-4.18に示した。図には各砂州の面積をとともWUA値を示す。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

区間内の砂州において、面積が最も大きいのは11番砂州である。WUAは通常面積の大きさと相関関係を有するが、例えば昆虫の生息場に注目して10,11番砂州を比較すると、面積の大きさに差異が見られるにも関わらず機能値はほぼ均等な値を示している。これは、水際における昆虫の機能が卓越していることから、ほぼ全域を植生で覆われている11番砂州より裸地域が大半を占める10番砂州での機能が、景観に機能値を与えることによって良好に評価された結果といえる。また同じく、10番砂州と11番砂州を比較すると、特に裸地域に生息適正があるチドリ、アリジゴク、カワラバッタにおいては植生砂州である11番砂州での機能が低くなっていることが分かる。機能のバランスを見ると、特に10,15番砂州では砂州面積に対して平均的に機能が分散されている。

##### (2) 区間内砂州における生態的機能の変遷

昆虫の生息適性は、全ての景観要素に分散しているため高い値を示し、砂州面積との強い相関が見られる。木津川の対象区間では、全域的に植生域が拡大したために植生域と裸地域を選

好する機能の割合が、過去30年間で特に1990年代を境に逆転していることが見てとれる。今後も人為的な改変がないかぎり植生域は拡大傾向にあると推察でき、裸地域を選好するチドリやカワラバタなどの希少種の生息場は今後失われていく可能性が高い。

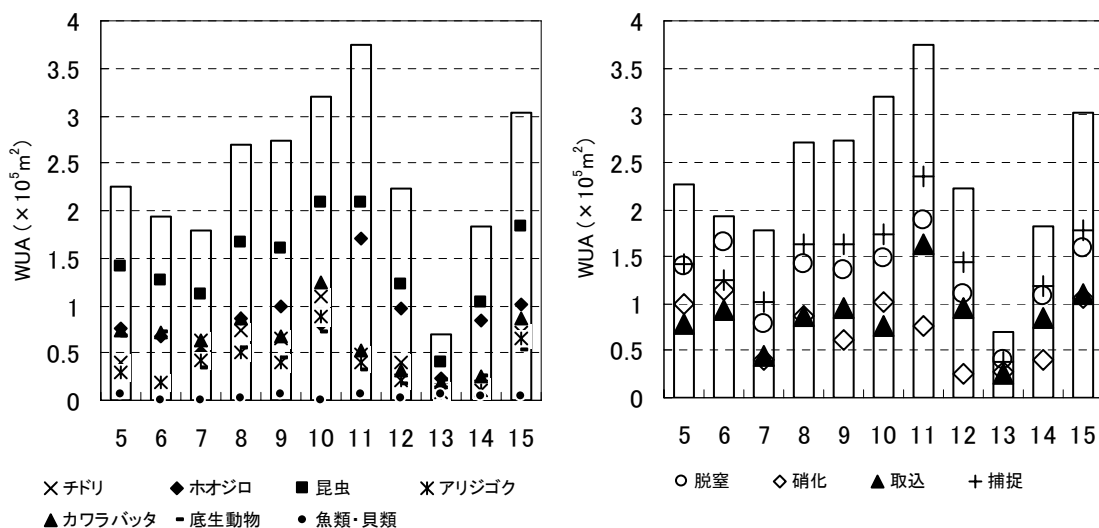


図-4.17 区間内砂州における生態的機能の分布 (2002年)

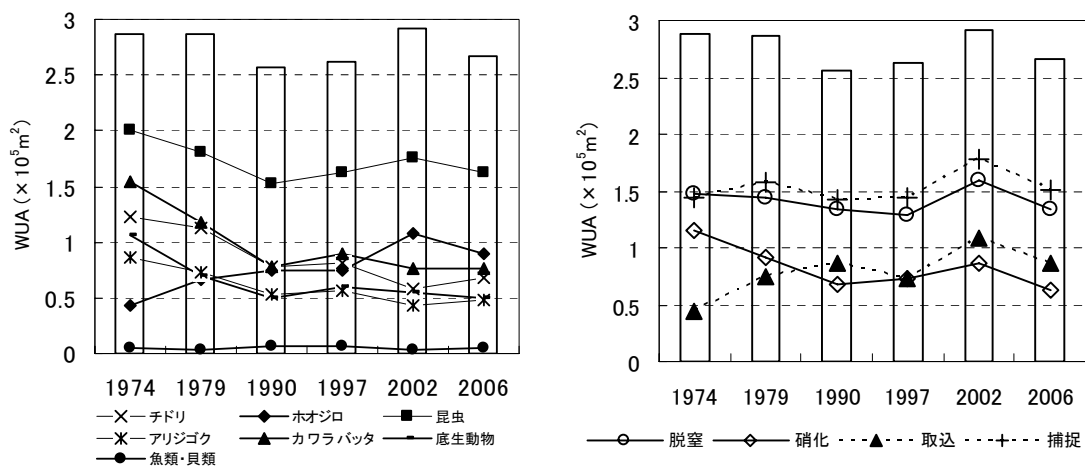


図-4.18 区間内砂州における生態的機能の変遷

### (3) まとめ

以上から、砂州が有する重要な生態的機能の時空間分布特性が把握できた。これらのデータをもとに、例えば、過去からの変遷を見て、その河川にとって重要な機能が著しく低下しているならば、それを保全するような施策や過去のある時点での機能評価値を機能の回復に向けた目標として設定することも可能となろう。また景観と機能を関連付けて評価しているため、機能の回復・復元の議論は、河川景観管理施策に直接反映できる。さらに、この評価によって明

らかになった機能の高い砂州の景観構成を手本に、他の砂州の景観管理を行うといったことも考えられる。このように、既存の簡単に手に入る情報を用いながら、環境という定性的なものを科学的に定量化し得る手法を構築できたことは、環境目標や保全戦略を考える上において非常に有用であるといえる。

#### 第 4.7 節 結語

本章では、第 3 章で構築した砂州景観評価枠組のうちの「景観解析手法による砂州景観分類」と「生態系機能ポテンシャル評価」を受け持つ。砂州河川の河川環境管理目標としてしばしば設定される「砂州景観の保全」に向けて、生態系機能の視点から指標化・定量化をおこない、木津川下流部でこれまで蓄積してきたデータをもとに検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 「景観解析」のパートでは、航空写真、横断測量データや流況データという簡単に入手できる情報を用いて、景観分類図を作成することにより、河道を構成している様々な景観要素の時空間分布特性を定量的に把握する手法を構築した。また、流況に応じた水位変動を砂州が冠水するエリア（冠水帯）として、景観分類の中に取り入れたことも特徴である。
- 2) 「生態系機能ポテンシャル評価」においては、環境の評価指標として①生物の生息適性と②物質循環の素過程の卓越性から成る 10 種類の「生態的機能」を抽出し生息適性に応じてレベル分類を行ったうえで、それらの重み付き生息利用可能面積（WUA）を算出した。それにより、河道内の各砂州が有する生態的機能の空間分布と過去 30 年におけるその変遷を捉えることが可能となった。

このように、既存の入手容易な情報を用いながら、環境という定性的なものを「景観」という概念を用いて科学的に定量化し得る手法を構築できたことは、環境目標や保全戦略を考える上において非常に有用であるといえる。

しかしながら、本研究では、場のポテンシャルは示せたものの、場と場の連結性やフラックスによって決定される機能の発現値の評価ができていない。また、個々の物質循環系や生物相のメカニズム研究についても今後精緻化が望まれるところでもあり、それらが精緻化されてくると、それを随時評価値に更新できるシステムを有している。

## 参考文献

- 有田正光：水圏の環境，東京電機大学出版局，pp.339-343，1998.
- 江頭進治，池田晶，永田徹：木津川河床材料の粒度分布調査データ集，立命館大学理工学部土木工学科水工研究室，pp.289-377，1998.
- 江崎保男，松原始：チドリを頂点とした食物網とその動態，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.91-103，2009.
- 遠藤彰，遠藤知二：木津川川原における訪花性昆虫群集の季節推移，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.163-180，2009.
- 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.
- 片貝武史，亀井文志，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.
- 片貝武史，井上佳菜，竹下幸美，辻本哲郎：木津川砂州における景観要素の構成とその変遷の把握，河川技術論文集，Vol.13，pp.135-140，2007.
- かせ澤成希，片貝武史，鷺見哲也，辻本哲郎：木津川砂州表層の土壌・被覆条件と鉛直水輸送の空間分布，河川技術論文集，Vol.12，pp.87-92，2006.
- 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.
- 桜谷保之：河川草地で越冬，越夏する昆虫類—特にテントウムシ類—，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，pp.399-402，2003.
- 桜谷保之：食物網図—昆虫類を中心とした食物網と季節的変動—，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，pp.469-489，2003.
- 桜谷保之：チョウ類群集の季節的，年次的変動，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，pp.373-380，2003.
- 鷺見哲也，荻島晃，片貝武史・辻本哲郎：砂州植生域の発達過程と植生の物理環境に関する研究，河川技術論文集，Vol.6，pp.65-70，2003.
- 谷田一三，平祥和，竹門康弘：砂州河川の一時的水体における底生動物相，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.213-222，2009.
- 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.
- 辻本哲郎: 手取川扇状地区間の河原の植物群落と河道特性, 日本海域研究所報告, 第 25 号, pp.83-99, 1993.
- 辻本哲郎, 寺井達也, 寺本敦子: 木津川下流部砂州の植生繁茂と裸地維持の仕組み, 河川技術に関する論文集, 第 8 巻, pp.307-312, 2002.
- 寺本敦子, 辻本哲郎: 植生域を伴う砂州の地形変化—木津川を例として—, 水工学論文集, Vol.49, pp.1021-1026, 2005.
- 松良俊明: マウンド上におけるアリジゴクの分布, 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.139, 2009.
- 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.
- 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, 2009.
- 中村太士, 辻本哲郎, 天野邦彦: 川の環境目標を考える～川健康診断～, 技報堂出版, 2008.
- 原田守博: 砂州の堆積構造, 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, pp.21-28, 2003.
- 福原修一, 森下郁子, 矢田敏晃, 木本紀子: 木津川魚類相の特性と砂州利用, 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.253-268, 2009.
- 松原始, 渡部聡之, 桜谷保之, 江崎保男: ホオジロの環境利用と餌の動態, 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.145-154, 2009.
- 宮脇真二郎, 戸田祐嗣, 花井駿介, 辻本哲郎: 航空写真・地形・流況データを用いた裸地砂州への植生の侵入・定着過程に関する研究, 河川技術論文集, Vol.12, pp.471-476, 2006.
- 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.
- 山岸哲, 松原始, 平松山治, 鷺見哲也, 江崎保男: チドリ 3 種の共存を可能にしている河川物理, 洪水にとまなう砂礫の分級, 応用生態工学, Vol.12(2), pp.79-85, 2009.
- Anbutsu, K., T. Nakajima, Y. Takemon, K. Tanida, N. Goto and O. Mitamura: 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.
- Milhaus, R.T., M.A. Updike, and D.M. Schneider :Physical Habitat Simulation System Manual-Version II, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Service Program, FWS/OBS-89/16, Fort



Collins, 1989.

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.



## 第5章 砂河川砂州の伏流流動による水質フラックス制御機能の評価

### 第5.1節 概説

ここでは、生態系機能の二つの側面のうち、第4章の視覚的な情報のみでは評価することが不可能であったフラックス型特性の機能評価を担う。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、砂州のどの部分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（辻本，2004）。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、本章では砂州が担う生態系機能の一つである窒素・リンの除去といった水質浄化を指標として取り上げる。ここでは、特に砂州伏流中の窒素動態に着目し、伏流環境下での脱窒反応による窒素の除去を水質浄化機能として定義する。

砂州の水質浄化に関わる窒素の硝化・脱窒反応について見ると、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、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（対馬ら，2002）。一方、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（中島ら，2003・鷺見ら，2004・片貝ら，2006）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（辻本ら，2008），それらは脱窒に影響を与えることが考えられる（図-5.1 参照）。

既往研究の中では、水質浄化機能は砂州景観要素それぞれの場が固有する『潜在性（ポテンシャル型特性）』と、その時その時の表流水や伏流水などの水理・水質環境によって具体的に機能が発現する『フラックス型特性』という二側面を有し、場の保全や再生に向けては双方のバランスへの着目が重要であることが指摘されている（尾花ら，2010）。また、砂州上の植生域においての脱窒ポテンシャルの卓越が明確にされている（中島ら，2008・Jacobs *et al.*, 1985・Schade *et al.*, 2001）がフラックスを考慮した水質浄化機能の定量化にまでは至っておらず、それに関する他の研究事例もほとんどみられない。

以上の背景から、本章では、特に砂州上の植生域の有無に着目して、伏流流動に伴う砂州の脱窒速度を、現地観測、室内実験および数値解析を援用して算出することを試みる。さらに、構築したモデルを用いて、砂州の土壌条件や植生の分布形状の違いが水質浄化機能に与える影響も検討する。

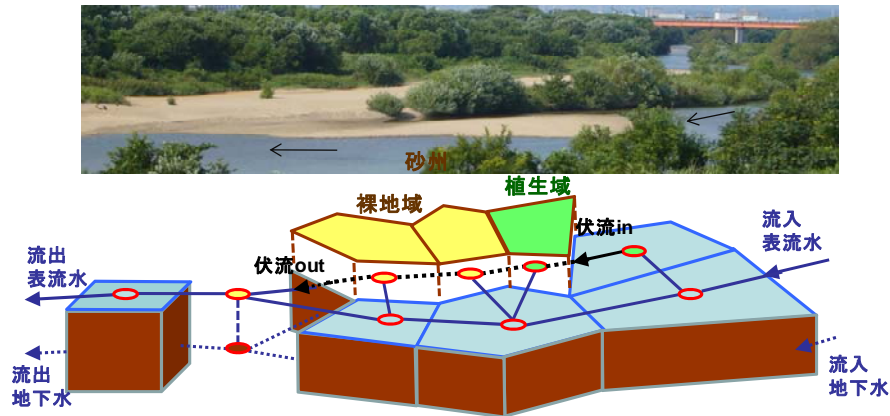


図-5.1 伏流による砂州景観要素の連結性

## 第 5.2 節 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 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、長野県下伊那郡平谷村地内の大川入山（標高 1,908m）に発し、巴川、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 1,830km<sup>2</sup> の一級河川である（図-5.2）。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 6,000～9,000 万年前より生成された領家花崗岩類が広がる。地表の花崗岩はマサ化し崩壊しやすいことから多量の流出土砂を生産し、それらは下流へと運搬される。このような地質の特徴によって矢作川は、典型的な砂河川の様相を呈している。

矢作川流域の河川形態は、生物の生息・生育基盤との観点から流域の地形、気候、土地利用等に依存する植生分布をもとに上流域・中流域・下流域に区分されている（矢作川水系河川整備計画、2009）。河道特性を概観すると、矢作ダムまでの上流域は森林に囲まれた源流域と山付きの溪流環境が特徴で、河床勾配 1/60 以上のセグメント M に属する。明治用水頭首工までの中流域は、本川に横断する 7 つの構造物によって湛水域と連続する瀬・淵が交互に形成される。瀬・淵環境はアユをはじめとする魚類の生息・産卵場として良好な環境を形成する一方、横断構造物による河床低下と砂利採取による河床材料の粗粒化が進行した区間でもある。河床勾配 1/130～1/800 のセグメント 1～2-1 に属する。明治用水頭首工より下流の下流域は、砂州の卓越が特徴的な、砂礫質を有する区間である。たまりやワンドなどの一時水域にはシマドジョウやカマツカ、砂礫砂州にはコチドリやコアジサシなどの鳥類をはじめとする様々な砂礫環境を好む生物に利用されている。その反面、昭和 50 年以降の高水敷の安定化に伴う樹林化の進行が砂州域を減少させているため、治水に配慮した砂州景観の保全が求められている。河床勾配 1/1200-1/2200 程度のセグメント 2-2～2-3 に属する。

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(鈴木ら, 1998)。

研究対象とする区間は、左岸が安城市、右岸が岡崎市、西尾市に接する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 6km 区間で、上記の下流部に位置する。河道内には、6 個の交互砂州が形成されており、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区間を対象としている。

### 5.2.1. 砂州景観分類

はじめに、航空写真を用いて区間内の砂州を 6 個に分類し、図-5.2 に示すように下流から各砂州に番号付けをした。さらに GIS を用いて、砂州を構成する植生域や裸地域、一時水域などの景観要素に分類し、各砂州の地形特性(砂州形状や周長)、植被率などを算出した。図-5.2 を見ると、美矢井橋より上流側区間は、河道内の大部分が植生で覆われていることが分かる。そのことは、表-5.1 に示す結果の各砂州の植被率からも明らかである。ここでは、植被率 60% 以上の砂州を「植生砂州」、35%以下の砂州を「裸地砂州」と呼ぶこととする。各砂州の植生分布形状は、植生砂州 No.3,4,5,6 とともに高水敷に帯状に植生が発達し、冠水頻度の高い水際部分には裸地域が残されていることが見てとれる。

本研究では、植生の有無が伏流流動による砂州の水質浄化機能に与える影響を評価することが目的であるため、特に「裸地域」と「植生域」という 2 種類の景観要素に着目する。そこで、以上の結果を用いて裸地砂州 No.1 と植生砂州 No.3 という表層景観の異なる 2 種類の砂州を対象砂州として選定した。裸地砂州は、図-5.3 を見ても明らかなように裸地のみで構成されている砂州である。一方、植生砂州には植生域のみならず裸地域も同時に存在していることが分かる。本研究では、特に裸地域と植生域の環境条件の違いを顕著に捉えるために、基盤情報について裸地砂州で得られた結果を裸地域の代表値として用い、植生砂州で得られた結果を植生域の代表値として用いることとする。

表-5.1 各砂州の地形特性

砂州 No.	総面積(m <sup>2</sup> )	植生域(m <sup>2</sup> )	裸地域(m <sup>2</sup> )	一時水域(m <sup>2</sup> )	植被率(%)	周長(m)	水際ライン(m)
1	60,971	6,766	54,205	2,187	11	1,809	1,034
2	94,504	33,154	61,350		35	1,800	1,094
3	201,655	177,821	23,834		88	3,654	1,504
4	290,131	218,870	71,261		75	3,609	1,921
5	411,326	321,328	89,998	1,726	78	4,744	2,295
6	135,554	81,207	54,347	659	60	2,244	1,189

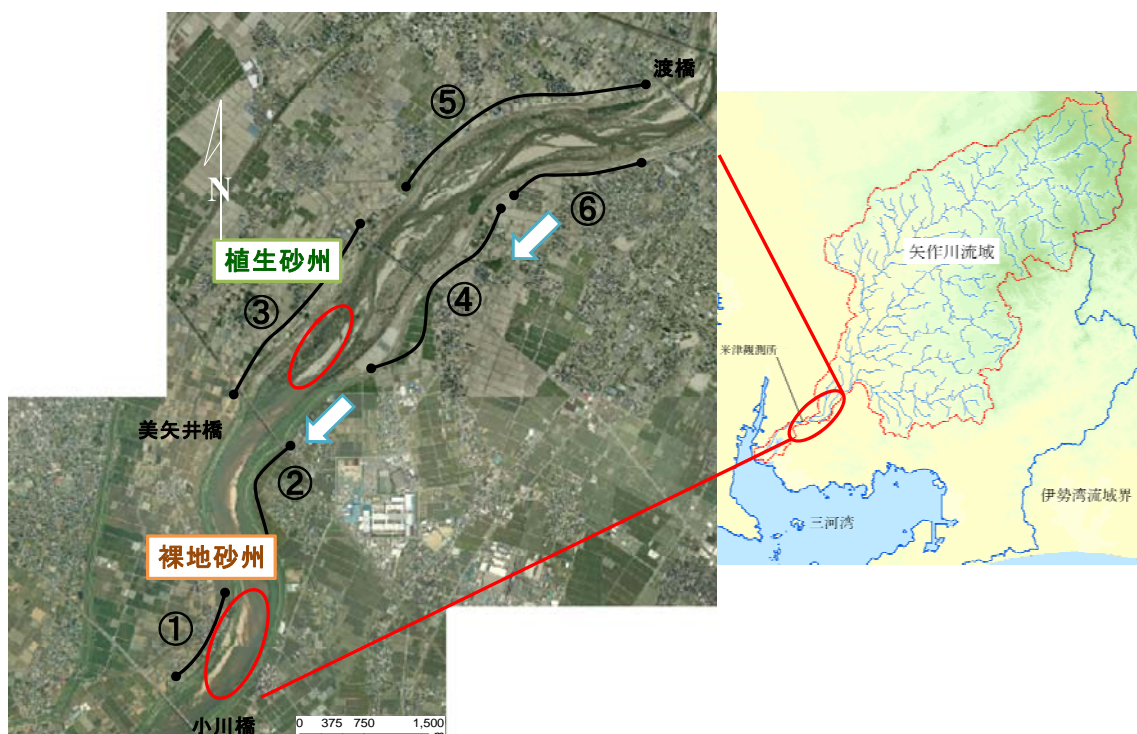


図-5.2 矢作川流域図と調査対象区間



図-5.3 対象砂州（左：裸地砂州，右：植生砂州）

### 第 5.3 節 砂州の物理基盤特性と伏流水質特性

伏流水とは、ここでは表流水が砂州水際部から浸透し、砂州内部を流下する過程を経て表流水に復帰する流れとする。砂州の水質浄化に関わる窒素の硝化・脱窒反応は伏流環境下で生起しており、水質形成過程には伏流の流向、距離や時間、土壌特性（透水性、保水性や土層構造）などが大きく影響する。そこで、砂州伏流環境下における浸透流挙動や窒素動態を、砂州基盤情報と関連づけて把握するために現地観測を行った。

### 5.3.1. 現地観測の概要

はじめに、伏流水の水位と水質を計測するため、塩化ビニールパイプを用いて作成した簡易井戸を、対象砂州に設置した(図-5.4, 図-5.5 参照)。裸地砂州では7か所、植生砂州においては水際に位置する植生域(以降、植生Aと呼ぶ)上および周りに3か所とその後方内陸側に位置する植生域(以降、植生Bと呼ぶ)周辺に3か所の観測地点を設けた。

まず、平水時河川表流水・伏流水質の変動特性を把握するため、2009年8月19日6:00a.m.～同年8月20日0:00p.m.の間で、3時間間隔で採水した。採水後、ただちに多項目水質計(YSI/Nanotech556)を用いて伏流水温、pH、溶存酸素量、酸化還元電位を測定した。また、冷蔵保管して持ち帰ったサンプリング試料を分析し、各水質項目(溶存無機態窒素、溶存有機炭素、全窒素)の濃度を定量した。水質分析には、自動分析器(SWAAT型, BLTEC)、全有機炭素計(TOC-V CPH, 島津製作所)および全窒素計(TNM-1, 島津製作所)を用いた。

採水と同時に伏流水位を計測するとともに、各砂州での水際標高を測量した。調査対象月の日降雨量(岡崎水質観測所)と日平均水位(木戸水位観測所)の経時変化と調査日を図-5.6に併せて示す。観測期間の2週間前に日20mm程度の降雨が見られるが、それによる大きな水位の変動はなく、観測時は比較的安定した平水時であることが分かる。

砂州土壌については、植生域と裸地域にて検土杖を用いて土層構造を調査するとともに、表層部・表層部下約100cmの深さの土壌を採取した。採取方法は、ハンマーを用いて塩化ビニール製パイプ(内径10.8cm, 厚さ0.3cm, 長さ約10cm)を土壌内に鉛直に打ち込み、土壌の攪乱を防ぐために、パイプ下端に塩化ビニール製の板を差し入れ、上端を押さえた状態で鉛直に引き上げた。採取した土壌は、持ち帰って各種試験(粒度試験, 透水試験, 水分特性試験)に供した。裸地域と植生域の表層部と表層下で採取した土壌サンプルを、次節以降では各々BS, BB, VS, VBと表記することとする。表-5.2に観測項目の一覧を示す。

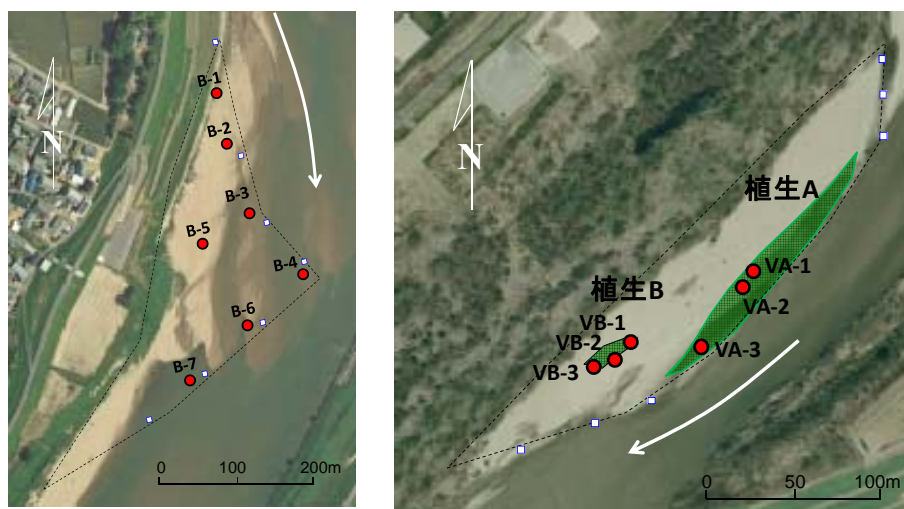


図-5.4 観測対象砂州と観測井戸設置地点(左:裸地砂州, 右:植生砂州)

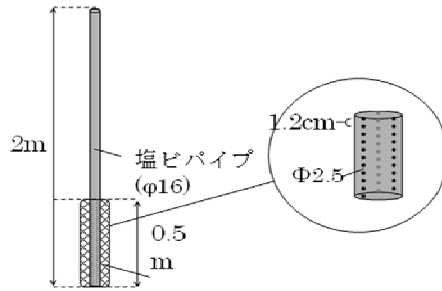


図-5.5 簡易井戸の概要

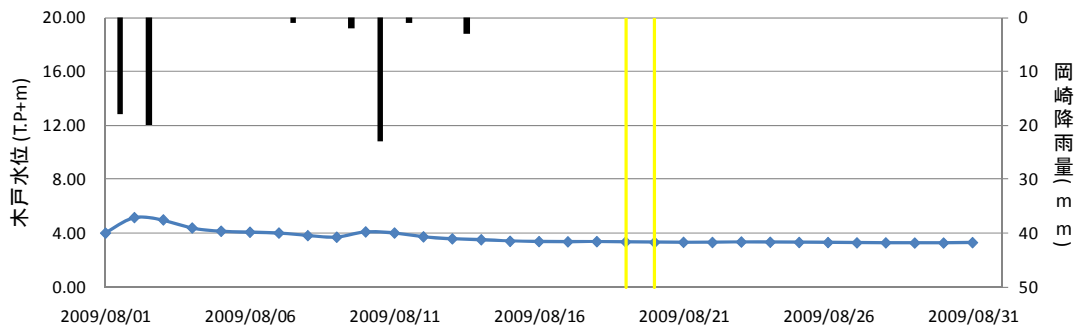


図-5.6 調査対象月の位況と調査日

表-5.2 測定項目一覧

	測定項目	測定方法および測定機器
水質調査	NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N	自動分析器 (SWAAT型, BLTEC)
	DOC	全有機炭素計 (TOC-V CPH, 島津製作所)
	T-N	全窒素計 (TNM-1, 島津製作所)
	DO, pH, 水温, ORP	多項目水質計 (YSI/Nanotech556)
土壌調査	粒度分布	ふるい分け試験
	透水係数	定水位透水試験
	水分保持特性	水分保持特性試験

### 5.3.2. 物理基盤特性の把握

砂州地形は、河川水流に駆動される土砂の運搬・堆積によって形成されている。そのため、砂州を構成する土壤粒径は空間的な非均質性を有しており、そのような土壤粒径の違いに依存する透水性や保水性などの土壤特性は、砂州を伏流する流れに影響を与える。そこで、粒度試験、透水試験および水分保持試験を実施し、各景観要素が有する物理基盤特性を整理する。



## (1) 粒度試験

ふるい分けによる粒度試験は、JISA1204に基づいて実施した。乾燥炉を用いて土壌サンプルを110度で12時間以上かけて乾燥させた後、4.75mmから0.075mmまで8種類のふるいを用いて分類した。

試験によって得られた粒度分布を図-5.7に示すとともに、各土壌特性を表-5.3に示す。裸地域と植生域の土壌の粒度分布には、以下に述べるような大きな特徴が見られる。地盤工学会(2001)の分類を参考にすると、裸地域では2mm以下の粗砂が70%、植生域では0.25mm以下の細砂・シルト分が60%程度存在するなど、二者の組成には大きな違いが見られる。粒度のばらつきを表す均等係数は、いずれも4.0以下を示しており、裸地域・植生域ともに均等な配合の土壌と言える。また、表層と下層とではほとんど違いがみられなかったが、下層においてもすでに述べたような景観要素ごとの特徴を有している。裸地域に比して、植生域で細粒分の優先が見られるのは、洪水時に植生群落が流れに対する抵抗として働き、その周囲の流速低下と細粒土砂の堆積の進行をうかがわせる。

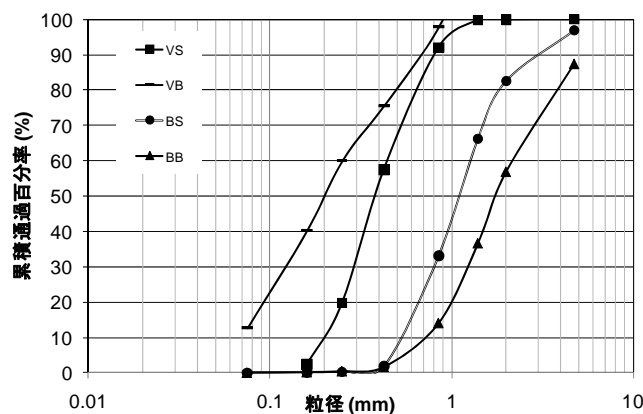


図-5.7 粒径加積曲線

表-5.3 土壌特性

	BS	BB	VS	VB
D <sub>50</sub> (mm)	1.01	1.70	0.38	0.20
D <sub>10</sub> (mm)	0.53	0.71	0.19	0.04
均等係数 U <sub>c</sub>	1.92	2.96	2.15	3.54

## (2) 透水試験

土壌内を移動する水の移動速度は、土壌の透水性に大きく影響される。その透水性をあらわす水理定数が透水係数であり、伏流流動解析において最も重要な水理定数であるといえる。透水性は、土の種類、密度や飽和度などによって大きく異なり、それに応じて透水係数を求める方法の選択も異なる。測定方法には、野外で採取した試料を用いた室内試験法、野外で行う揚水試験法やスラグ試験法などがあるが、ここでは上述した粒度分布を参考にして、主として砂

で構成される土壤に主に適用される定水位透水試験法にて透水係数を算出した (図-5.8).

測定方法は, カラムに土壤サンプルを充填し, 流入端と流出端の水頭を一定に保って試験を実施する. 試験カラムの断面積  $A$  と長さ  $L$  に加え, 流出量  $Q$ , 流入端と流出端の水位差  $\Delta h$  を計測し, 式(5.1)から透水係数を算出した. 水温は, 現地観測時の平均水温  $27^{\circ}\text{C}$  に補正を行った.

$$k = \frac{L}{\Delta h} \cdot \frac{Q}{A} \quad (5.1)$$

また, 上記の方法とともに対象とした土壤サンプルが比較的均一な砂であったため, 10%粒径 (以下,  $D_{10}(\text{mm})$  と記す) から透水係数を求める実験式 Hazen 式  $k = D_{10}^2 (\text{cm/s})$  を用いて透水係数を算出した. 表-5.4 に示す結果を見ると, 裸地域では透水性が高く, 植生域では低いことが分かる. 粒子径が大きいほど透水性が高くなるため, 主に粗砂で構成されている裸地域と砂のみならずシルト分を含む植生域の粒度組成の違いが結果に反映されている. 下層土壤の透水係数は, 前節で得られた粒度分布の  $D_{10}$  を用いて実験式によって算出した. 各景観要素の表層と下層を比較すると, 特に特徴的な違いは見られないことが分かる.

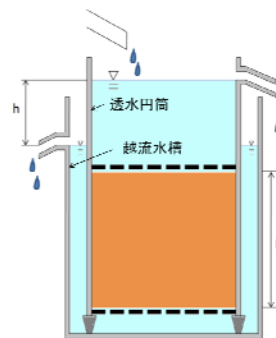


図-5.8 定水位法

表-5.4 透水係数

	BS	BB	VS	VB
定水位透水係数 試験値 $k$ (cm/s)	0.8	-	0.02	-
Hazen式による 透水係数 $k$ (cm/s)	0.2	0.5	0.03	0.02
Ave.(cm/s)	0.5	-	0.02	

### (3) 水分保持試験

土壤は水分を保持する保水性という特徴を有し, 土の水分量によってそれは変化する. 土中水のもつ運動エネルギーを定量的に表す化学ポテンシャル  $\Psi$  は, マトリックポテンシャル  $\Psi_m$  (粒子間の表面張力や粒子表面の吸着力により粒子が水を引きつける作用), 浸透ポテンシャル  $\Psi_0$  (土壤水中の溶質の作用), 重力ポテンシャル  $\Psi_z$  (その水がある高さの差) に分けられる. このうち, マトリックポテンシャルと土壤の体積含水量との関係を表したものを土壤水分特性といい, 不飽和土壤中の水の移動量と保水性を把握する際に重要な指標となる. 本研究では, Campbell (1974) の解法を参考にして土壤水分特性を表す.

水分特性試験の測定は, 体積含水率の計測装置 TDR (Time Domain Reflector :TRIME 社製,

TRIME-MUX6) とテンシオメータ (KONA SYSTEM 社製 : KDC-S5) に接続されたポーラスカップ (外径 8mm, 長さ 60mm) を用いる方法で行った. より高い負圧まで容易に測定できるように, 図-5.9 に示すような土壌サンプルの下に約 40cm の砂柱を継ぎ足したカラムを用い, マトリックポテンシャル  $\psi_m$  と体積含水率  $\theta$  の関係を調べた. 実験装置には, はじめにサンプルにテンシオメータに接続されたポーラスカップを 2 本挿入する. ポーラスカップと連結している水管に脱気水を満たし, ポーラスカップから染み出した水をサンプルの土壌水と連続させてその水圧を測る. また, 2 つのポーラスカップの間に TDR のプローブを差し込む.

試験は, はじめに装置下端から水を浸透させ, 土壌サンプルの上端まで飽和させ安定した後, マトリックポテンシャルと体積含水率の測定を同時に開始する. 下端から排水を開始し, 排水が終了するまで測定を続けた. このようにして, 圧力センサーにより得られたマトリックポテンシャルの平均値と TDR センサーから得られる体積含水率をグラフにプロットすることによって, 図-5.10 に示す水分特性曲線を得た.

今回の測定方法では, 高い負圧領域におけるデータを得ることが難しいため, Campbell (1974) を参考にして近似した. 空気侵入ポテンシャル  $\psi_e$  と実験定数  $b$  は, 排水過程のマトリックポテンシャルと体積含水率を両対数スケールでプロットし, 直線回帰して求めた. この回帰直線の切片と傾きがそれぞれ  $\psi_e$  と  $b$  になる. 図-5.10 に試験結果と近似した曲線を合わせて示し, 表-5.5 に求めた各パラメータを示す.

裸地域と植生域では土壌の保水性に大きな差があることが示され, 特に植生域の土壌は, 裸地域の土壌に比べ, 同じ含水状態において保水性がはるかに優れていることが分かった.

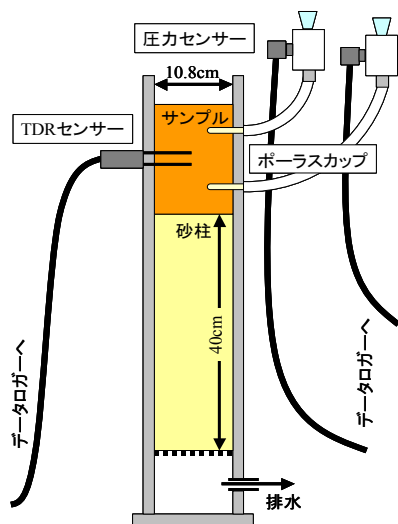


図-5.9 土壌水分特性試験装置

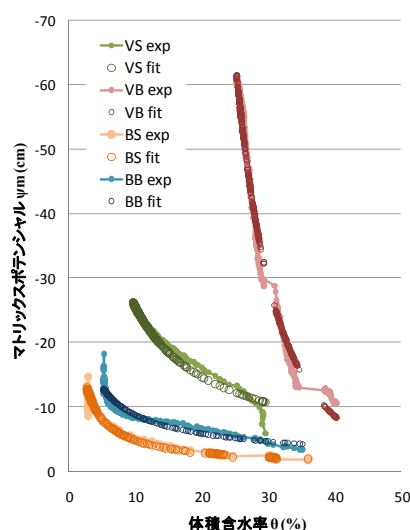


図-5.10 水分特性曲線

表-5.5 各土壌パラメータ

	BS	BB	VS	VB
$\theta_s$	0.43	0.37	0.38	0.46
$\psi_e$ (cm)	-3.71	-1.83	-8.80	-4.62
$b$	0.58	0.75	0.80	4.29

(4) 土層構造

観測対象砂州における土層構造を調べるために、検土壌を用いて深度約 1.5m の土壌サンプリングを行った。検土杖を土壌深くに差し込み、土層の垂直配列を崩さないようにゆっくりと引き抜いた。サンプリングした土壌を目視で確認し、砂、細砂、シルト混じり砂、粘土と分類した。裸地域では、1.4m 程度までは全て砂から構成されていた。植生域では、0.5m までは細砂、1.4m まではシルト混じりの砂であることを確認した。裸地域、植生域ともに地上から 1.4m 程度のところには粘土からなる難透水層が位置しており、また、伏流水面は、0.7m 程度付近を流下していた。

(5) 観測砂州の地形特性と水面勾配

観測対象砂州のスケールと水面勾配を図-5.11 に示す。各砂州の水面勾配は、水際の標高を測量した結果を用いて算出した。裸地砂州は、縦断距離 450m、最大横断距離約 120m、水面勾配 1/600 であった。井戸 B-4 と B-6 の間が、特に急勾配になっており、現地観測においても速い流れの瀬を確認したため、伏流水の流れがその付近に集中する可能性が考えられる。また、裸地砂州での比高（表流水面からの高さ）は約 0.6m であり、起伏はほとんどなく平坦な地形である。一方、植生砂州は縦断距離 250m、最大横断距離 50m、水面勾配が 1/1250 となり、ひじょうにゆるやかな勾配となっていることが分かる。植生砂州の比高は平均約 0.8m であるが、特に植生域では最大比高約 1.8m と洪水時の細砂の捕捉に伴い、比高が高くなっている。植生域に生育している植物種としては、草本類ではツルヨシやヤナギタデ、木本類ではヤナギ類を確認した。

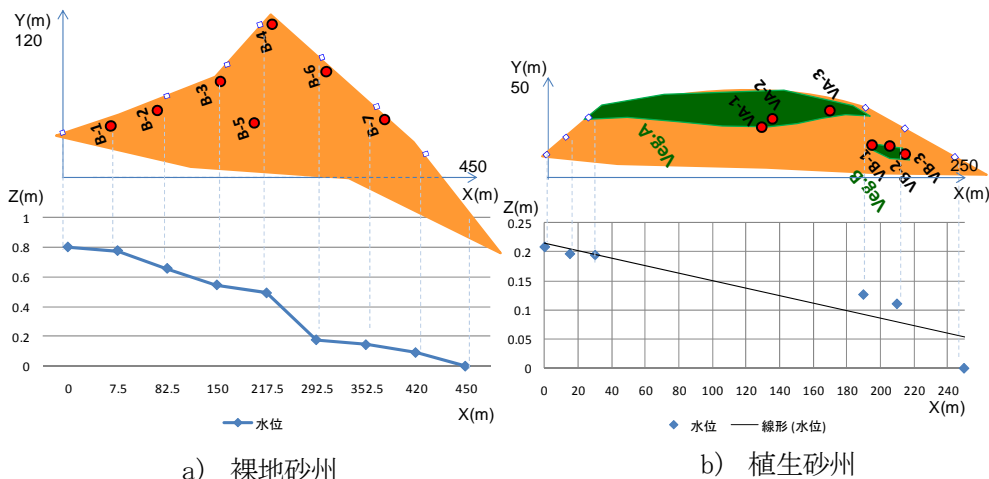


図-5.11 観測対象砂州のスケールと水面勾配

### 5.3.3. 伏流水観測

砂州の水質浄化に関わる窒素の硝化・脱窒反応は伏流環境下で生起しており、水質形成過程には伏流の流向、距離や流動時間が影響する。特に、本研究において対象となっている窒素循環過程における硝化・脱窒反応は、土壌中の微生物の増殖・活動によって生起する。それらの反応を担う硝化細菌（偏性好気性菌）や脱窒菌（通性嫌気性菌）は、一般的に好氣的条件下では硝化作用、嫌氣的条件下で脱窒作用に働きかけるとともに、溶存酸素量、水温や pH にも至適性を有している（千種，1996）。また、硝化・脱窒基質である形態別の溶存無機態窒素の存在量を明らかにすることは重要である。そこで、対象とする砂州がどのような環境特性を保持しているのかを把握するために、伏流挙動と景観要素の違いに着目した伏流水質の空間分布特性を、現地観測の結果をもとに考察する。

#### (1) 伏流水質特性

裸地砂州と植生砂州での現地観測により得られた伏流水質結果を図-5.12 に示す。観測は、36 時間の間に約 3 時間間隔で行ったが、日変化は微小で観測期間中を定常状態とみなした。図には各水質項目（酸化還元電位、溶存酸素量、溶存有機炭素、物質形態別の全窒素濃度）の日平均値と標準偏差を示している。また、表流水（河口から 20km 地点）の水質結果も水質項目ごとに同グラフ上に併記した。

酸化還元電位（Oxidation-reduction Potential: ORP）は、ある酸化還元反応系における電子のやり取りの際に発生する電位のことであり、物質の電子の放出しやすさ（+）、あるいは受け取りやすさ（-）を定量的に評価する指標でもある。結果を見ると、裸地砂州では自然淡水域での標準的な値でもある 100 前後が平均値であるのに対して、植生砂州では平均的にマイナスの値を示している。すなわち、植生域での還元反応が進みやすい環境となっていることが明らかである。

溶存酸素量（Dissolved Oxygen: DO）は、水中に溶存する酸素量のことであり、水域での水質浄化において最も重要な因子である。そして、有機物の生物化学的分解や窒素の硝化反応などに直接関与するとともに、脱窒反応に関与する微生物の生存そのものや増殖速度を律するものでもある。結果を見ると、いずれの砂州においても伏流水の方が表流水での濃度より低い濃度を示している。また、裸地砂州と植生砂州を比較すると、植生砂州の方が 1.3~3.5mg/l と裸地砂州より低く、嫌氣的環境が形成されており、これは ORP の結果とも一致する。裸地砂州での DO 濃度の空間分布を見ると、伏流に伴う B2→B5→B7 への流れに沿って、DO 濃度の減少が見られる。これには、有機物の生物化学的分解に加えて、NH<sub>4</sub>-N が硝化菌によって亜硝酸から硝酸へと酸化される過程での DO の消費が考えられる。

溶存有機炭素（Dissolved Organic Carbon: DOC）は、水中に存在する有機化合物中の炭素量のことである。DOC 濃度も DO と同様に水質浄化において重要な因子であり、特に脱窒反応に直

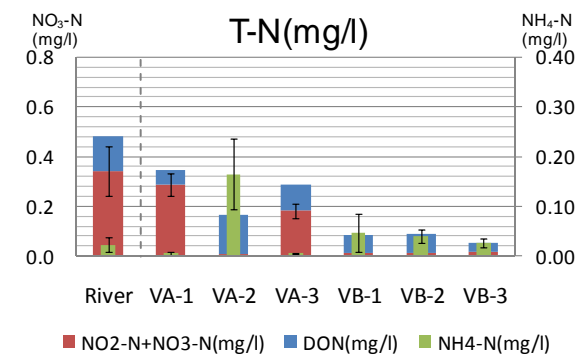
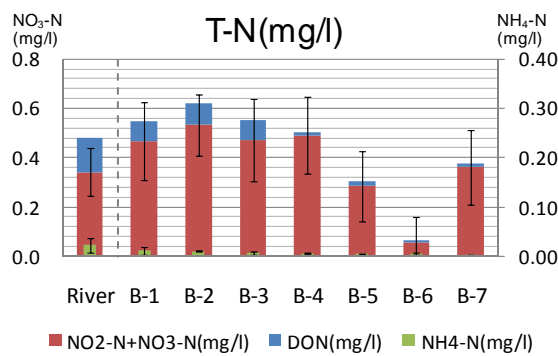
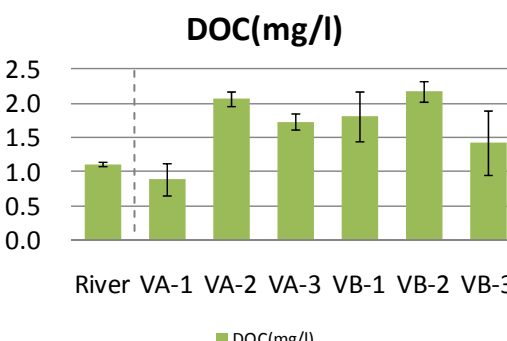
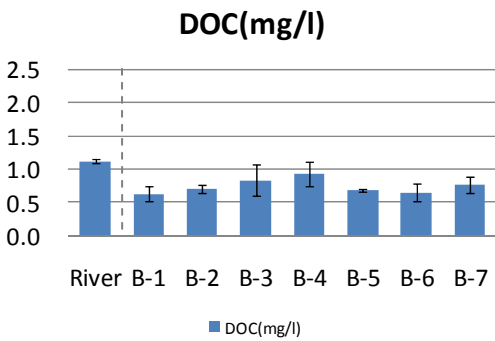
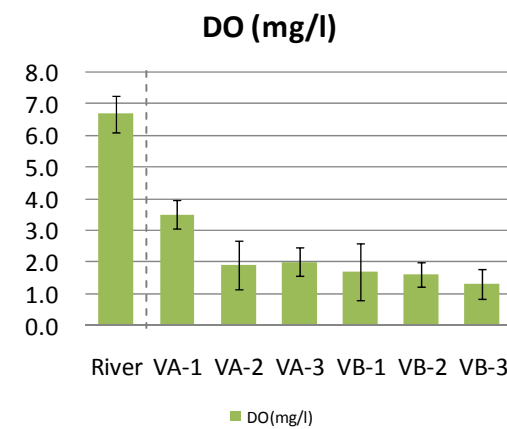
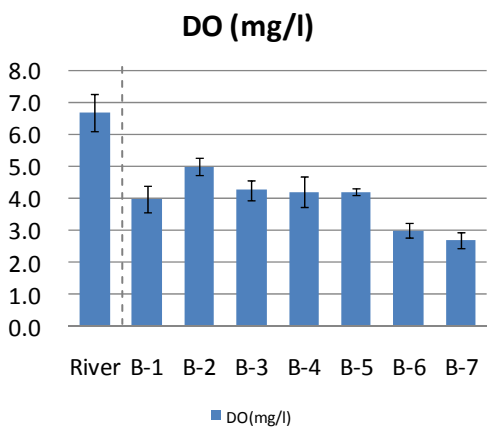
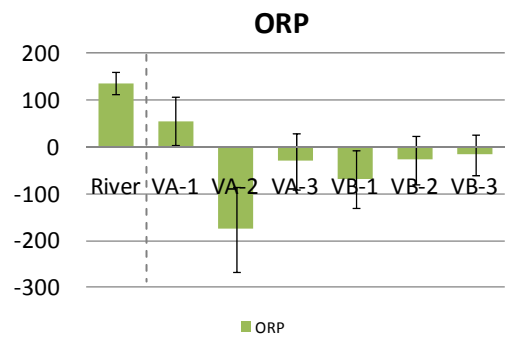
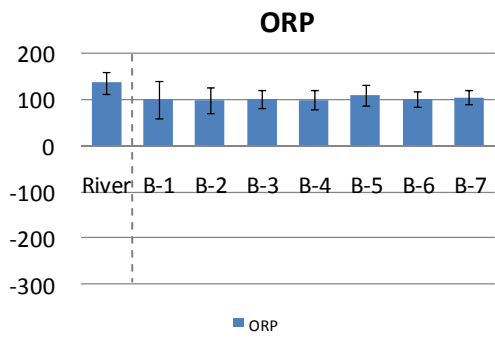
接的に関与する。DOCが豊富であると、微生物のエネルギー源となりその活発な活動を促進する (Fisher and Linkens, 1973)。活発な活動による酸素消費は、その場を還元的な条件へと変える (Hynes, 1983)。結果を見ると、植生砂州での濃度が裸地砂州より2倍程度高いことが分かる。

pHと水温は、微生物の生存と増殖速度に対して至適性を有しており (長谷部, 1990)、水質浄化に関わる重要な因子である。楠田 (1994)・千種 (1996) らは、硝化・脱窒反応が生じる最適 pH 値は 6.5-8.5 であり、最適温度は 25-30°C であると明示している。観測によって得られた平均値を見ると、裸地砂州では pH が  $6.6 \pm 0.1$ 、水温が  $27.7 \pm 0.6$ °C、植生砂州では pH が  $6.2 \pm 0.2$ 、水温が  $26.3 \pm 0.5$ °C であった。日変化のばらつきを含めるといずれの値も最適範囲内に収まっているため、硝化細菌・脱窒菌にとって活動しやすい環境が整っていることが分かる。

栄養塩濃度として、溶存態の全窒素濃度とともに形態別の無機態窒素の内訳を示す。まず、表流水の窒素形態を見ると、硝酸態窒素が8割を占める一方、アンモニア態窒素は微量であることが分かる。これは、窒素化合物に関して、好気的な環境である河川において、表流水は十分に硝化作用を受け、窒素について最も酸化された形態で存在しているためと考えられる。

次に、裸地砂州での伏流水質に着目すると、表流水の硝酸態窒素濃度を平均的に上回っている。それに比して、アンモニア態窒素は流下に伴い減少する傾向が見られ、これは DO の観測結果からの推測とも一致し、硝化反応によるものと考えられる。しかし、下流側 (B-5, B-6) での硝酸態窒素濃度は上流側より減少している。硝酸態窒素濃度の減少は、微生物の働きによる脱窒反応に起因することが多い。裸地砂州での環境条件は、硝化反応のみならず脱窒が生起する範囲内にも属しているため、土壌内は環境因子のバランスによって、複雑な生物化学反応が生起する場であるといえる。

一方、植生砂州における窒素存在形態は、裸地砂州とは異なる様相を呈する。まず、表流水濃度を比較すると、平均的な窒素総量は1/3程度減少していることが分かる。ORP, DO, DOC, pH や水温の空間分布特性で既述したように、植生域は還元的条件を有し脱窒反応が生起する環境が整っているため、硝酸態窒素濃度の減少は脱窒反応によるものと考えられる。その一方で、裸地砂州ではほとんど検出されなかったアンモニア態窒素が硝酸態窒素の存在量を上回っていることが分かる。このことは、豊富な有機物の生物化学的分解が活発であるにも関わらず、還元的な環境下である植生域では硝化反応が生起しづらい状況であったものと推察される。なお、亜硝酸態窒素濃度は微量であったため、分析の際に検出限界を下回り計測できなかった。そのため、硝酸態窒素と合わせた値としてまとめている。



a) 裸地砂州

b) 植生砂州

図-5.12 各砂州での水質空間分布

#### 5.3.4. まとめ

以上のように、現地観測と室内試験を行い、砂州の裸地域と植生域の物理基盤特性および伏流水質特性を明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- ・各景観要素の土壌粒径は、裸地域は粗砂、植生域はシルト混じりの細砂から構成されており、粒径に依存して透水係数にも違いがあることが確認された。
- ・各砂州での土層構造調査の結果から、地上から約 0.7m 地点に伏流水面、約 1.4m 地点に粘土から成る難透水層を確認した。
- ・伏流水質の結果から、裸地域と植生域では、ORP、DO、DOC、水温や pH などの水質浄化に関与する環境因子に特徴的な違いが見られることが明らかになった。特に、植生域は ORP、DO が顕著に低く還元的な環境であり、また DOC も高いため、脱窒菌の活動を促進する条件が整っていることが示唆された。

### 第 5.4 節 伏流水・物質輸送解析

5-3 節の結果から、表流水が砂州を伏流する過程において、有機物や無機物の酸化分解などの生物化学的反応を受けて、窒素濃度が変化するものと推定された。特に、植生域では脱窒作用によるものと推察される硝酸態窒素の減少が確認された。そこで、本研究では砂州伏流にともなう窒素除去能を定量化して砂州の特徴と関連させたさまざまな議論を行うため、伏流水流動と伏流にともな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。

#### 5.4.1. 数値解析モデルの概要

数値解析は、まず浸透流の基礎方程式を解いたのち、伏流環境下での窒素循環過程における硝化・脱窒反応を考慮した物質輸送方程式を解くという手順で、伏流水・物質輸送の解析を行った。実現現象は 3 次元的であるが、本研究では簡単のため、降雨や植物の吸い上げによって生じる鉛直の動きは無視し、砂州域での水平流動のみに着目して平面 2 次元の解析を行った。

##### (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。前節で詳述した土層構造についての現地観測の結果、砂州伏流水水位より 0.7m 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と簡略化した砂州を対象とした。このため解析では、水平な下端難透水層上の伏流流動に対して、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。



$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (5.2)$$

ここに、 $h$ ：難透水層上面からの伏流水位、 $\lambda$ ：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-5.13 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 態であるアンモニアイオン、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  $C_{\text{NH}_4\text{-N}}$ 、 $C_{\text{NO}_3\text{-N}}$ 、 $C_{\text{NO}_2\text{-N}}$  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 ( $C_{\text{NH}_4\text{-N}}$ 、 $C_{\text{NO}_3\text{-N}}$ 、 $C_{\text{NO}_2\text{-N}}$ ) に関する移流分散方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + R_i \quad (5.3)$$

ここに、 $u$ 、 $v$ ：浸透層平均流速、 $D$ ：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 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ) の別を表わす指標である。生物化学反応項  $R$  については、図-5.13 中の黒い矢印で示した反応をモデル中で考慮するものである。生物化学反応項  $R_{\text{NH}_4\text{-N}}$ 、 $R_{\text{NO}_3\text{-N}}$ 、 $R_{\text{NO}_2\text{-N}}$  は、それぞれ、生物化学反応の組み合わせにより以下となる。

$$R_{\text{NH}_4\text{-N}} = R_{\text{DNH}_4} - R_{\text{NS}} \quad (5.4)$$

$$R_{\text{NO}_3\text{-N}} = R_{\text{NB}} - R_{\text{DA}} \quad (5.5)$$

$$R_{\text{NO}_2\text{-N}} = R_{\text{NS}} - R_{\text{NB}} + R_{\text{DA}} - R_{\text{DI}} \quad (5.6)$$

ここに、 $R_{\text{DNH}_4}$ ：脱アミノ反応速度、 $R_{\text{NS}}$ ：アンモニア酸化速度、 $R_{\text{NB}}$ ：亜硝酸酸化速度、 $R_{\text{DA}}$ ：硝酸還元速度、 $R_{\text{DI}}$ ：亜硝酸還元（脱窒）速度である。

5.3.3 節で述べたように微生物反応を律する DO、DOC や N の存在量は窒素動態に直接的に関与している。そこで、変換対象となっている N、DO、DOC が硝化・脱窒反応の制限物質であるとして、微生物反応は Monod 式で、DO による制限作用は DO 濃度のモノー式的表現の 1 との差で表せるとすると、基質消費式はそれぞれ以下のように定式化される。

$$R_{\text{DNH}_4} = k_{\text{DON}} \cdot \text{NH}_4 \cdot C_{\text{DON}} \cdot X_{\text{H}} \quad (5.7)$$

$$R_{\text{NS}} = \frac{1}{Y_{\text{NS}}} \mu_{\text{NS}} \cdot \frac{C_{\text{DO}}}{K_{\text{S-NS-DO}} + C_{\text{DO}}} \cdot X_{\text{NS}} \cdot \frac{C_{\text{NH}_4}}{K_{\text{S-NS-NH}_4} + C_{\text{NH}_4}} \quad (5.8)$$

$$R_{\text{NB}} = \frac{1}{Y_{\text{NB}}} \mu_{\text{NB}} \cdot \frac{C_{\text{DO}}}{K_{\text{S-NB-DO}} + C_{\text{DO}}} \cdot X_{\text{NB}} \cdot \frac{C_{\text{NO}_2}}{K_{\text{S-NB-NO}_2} + C_{\text{NO}_2}} \quad (5.9)$$

$$R_{DA} = \frac{1}{Y_{DA}} \mu_{DA} \cdot \left( 1 - \frac{C_{DO}}{K_{S,DA-DO} + C_{DO}} \right) \left( \frac{C_{DOC}}{K_{S,DA-DOC} + C_{DOC}} \right) \cdot X_{DI} \cdot \frac{C_{NO_3}}{K_{S,DA-NO_3} + C_{NO_3}} \quad (5.10)$$

$$R_{DI} = \frac{1}{Y_{DI}} \mu_{DI} \cdot \left( 1 - \frac{C_{DO}}{K_{S,DI-DO} + C_{DO}} \right) \left( \frac{C_{DOC}}{K_{S,DI-DOC} + C_{DOC}} \right) \cdot X_{DI} \cdot \frac{C_{NO_2}}{K_{S,DI-NO_2} + C_{NO_2}} \quad (5.11)$$

ここに、 $Y$ ：菌体収率， $\mu$ ：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，下付添字については， $DNH_4$ ：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， $DOC$ ：溶解性有機炭素， $DON$ ：溶解性有機窒素， $H$ ：通性嫌気性細菌を示す。

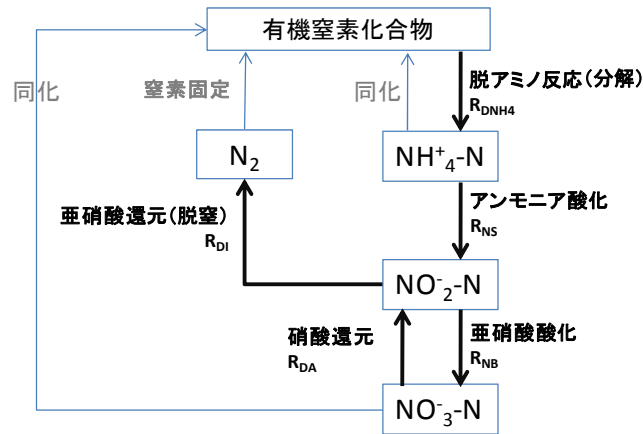


図-5.13 窒素循環過程

#### 5.4.2. 再現計算

まず，数値解析の結果を現地観測結果と比較した．簡略化された数値解析で，現地での観測結果がどのように表現されるかを確認するためのものである．よって，ここでの数値解析は，5-3 節で観測した裸地砂州と植生砂州を対象とした．

##### (1) 解析方法および条件

伏流水流動解析については，支配方程式を陰解法によって解いた．解析領域として，砂州形状とスケールは現地砂州を想定した．裸地砂州では 7.5m 格子，植生砂州では 5m 格子に離散化し，時間刻みを 1 時間として解析を行った．境界条件は，河川水域との境界部では，各砂州での水際の実測水位を与え，砂州陸側との境界部においては，横断方向の水位勾配をゼロとした．解析に用いる透水係数は，現地観測結果を参考に裸地域，植生域でそれぞれ  $k=5.0 \times 10^{-3}(\text{m/s})$ ， $2.0 \times 10^{-5}(\text{m/s})$  とした．

物質輸送解析については、式(5.3)を伏流水流動解析から得られる  $u, v, h$  を用いて差分法により解いた。分散係数は、楠田(1994)の値を用いて、それぞれ  $D_{\text{NH}_4\text{-N}}=2.0 \times 10^{-9}(\text{m}^2/\text{s})$ ,  $D_{\text{NO}_3\text{-N}}=1.6 \times 10^{-9}(\text{m}^2/\text{s})$ ,  $D_{\text{NO}_2\text{-N}}=1.9 \times 10^{-9}(\text{m}^2/\text{s})$ とした。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河川水質値  $C_{\text{NH}_4\text{-N}}=0.023(\text{mg}/\text{l})$ ,  $C_{\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}}=0.34(\text{mg}/\text{l})$ 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、前節において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た溶存酸素濃度、溶存有機炭素濃度、溶解性有機窒素濃度については、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-5.6にとりまとめて示す。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、文献値を参考に決めざるを得ないが、これらについては裸地域と植生域で同じ値を与えた。計算に用いたパラメータの一覧を表-5.7に示す。これら溶解性有機窒素濃度、溶存有機炭素濃度、溶存酸素濃度については、本来それらの移流分散反応方程式を解析して取り込むことが望ましいが、ここではこれらを砂州の裸地域と植生域のポテンシャルと考えた。この妥当性については、今後の課題とする。

表-5.6 解析で用いた各物質濃度

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

表-5.7 生物化学反応パラメータ

	$R_{\text{DNH}_4}$	$R_{\text{NS}}$	$R_{\text{NB}}$	$R_{\text{DA}}$	$R_{\text{DI}}$	出典
$X(\text{mg}/\text{l})$	0.50	0.30	0.10	1.0	3.0	宗宮,1990
$Y(\text{mg}\cdot\text{cell}/\text{mg})$		0.13	0.05	0.60	0.72	楠田,1994
$\mu(\text{s}^{-1})$		$5.3 \times 10^{-6}$	$8.3 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-4}$	楠田,1994
$K_S(\text{mg}/\text{l})$		5.0	$5.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-4}$	楠田,1994 仮定値
$K_{\text{S}\cdot\text{DO}}(\text{mg}/\text{l})$		0.20	0.20	0.20	0.20	楠田,1994
$K_{\text{S}\cdot\text{DOC}}(\text{mg}/\text{l})$				0.70	9.0	仮定値
$k(\text{l}/\text{mg}/\text{s})$	$2.2 \times 10^{-7}$					楠田,1994

## (2) 解析結果

### a) 伏流流動解析

伏流流動解析の結果を図-5.14に示す。裸地砂州では、砂州中央で水位勾配が大きいいため早い流れとなっており、また砂州の平面形状の特徴から、その水際部に流れが集中し伏流出口があることが分かる。また、前節でも述べたように、本川ではその付近に早い流れの瀬があることを確認している。堤防側を流下する流れは、ほぼ直線的に砂州を流下するが、Y軸方向60m付近から流入した流れは、伏流出口へ向かって砂州を横断するように流下する。植生砂州では、植生域にてきわめて遅い流れになり、その影響が周辺に及んでいることが分かる。これは裸地域と植生域での透水係数の違いが、流速として反映されている結果である。また、この植生域を避ける流れも植生上流側で発生している。水位分布はほとんど階段状であるため、流下方向に一様な流れである。

伏流水の平均滞留時間を概算するために、砂州の縦断距離にはばらつきがあることから、砂州面積に砂州の最大横断距離を除いた値を砂州平均長さとして定義した。裸地砂州と植生砂州の平均長さはそれぞれ250m、225mであり、各々の平均滞留時間の概算は、11.5カ月、17カ月程度となった。各砂州における水面勾配の違いが流動時間の差としてあらわれており、伏流水は、表流水に比べてひじょうに遅い流れとなっていることが分かる。しかしながら、伏流中にも降雨浸透や洪水による砂州の冠水などのイベントに応じて流下速度が変化することが考えられるため、現実的な流動とは少なからず異なることを念頭に置く必要がある。

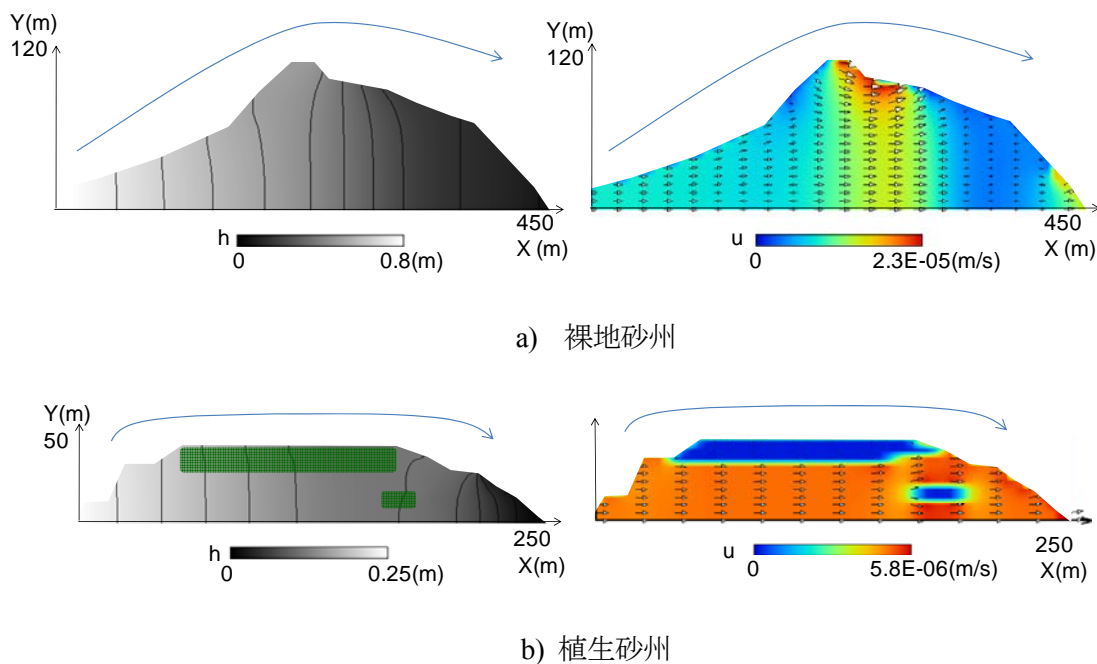


図-5.14 伏流流動解析結果 (左図：水位分布，右図：流速ベクトル)

## b) 物質輸送解析

物質輸送解析を定常になるまで計算した結果を図-5.15 に示す。裸地砂州の結果をみると、現地観測結果は硝酸態窒素濃度が高く、アンモニア態窒素濃度が微量であることを示している。計算値は、初期濃度に比べて硝酸態窒素濃度は標準偏差の範囲内程度で増加し、アンモニア態窒素は微小ながら減少している状況を呈し、概ね観測値の傾向は捉えているといえる。これは硝化反応によるものといえる。植生砂州の結果をみると、現地観測結果では硝酸態窒素濃度が低く、アンモニア態窒素濃度が高いことに対して、計算値はその概ねの傾向を表現できている。初期濃度と比較すると、脱窒作用によって硝酸態窒素濃度は半分以下に減少している一方、アンモニア態窒素濃度は 5%増加している。しかし、いずれの砂州においても各物質濃度の増減の傾向を捉えているものの、砂州内の空間分布における微小変化までは詳述できていない。この原因として、解析では、局所的な地形特性の違いから生じる複雑な流動特性や水位変動のみならず、土壌粒子によるろ過、沈殿や吸脱着などの物理化学的作用を考慮していないことが考えられる。

以上から、解析では現実の砂州内の物質濃度の局所変化を確実に再現するまでには至っていないが、本研究で着目している景観要素の違いに応じた伏流流動特性や微生物反応による各態窒素の濃度変化の傾向は捉えられているものと判断した。よって、次節では本解析モデルを用いて土壌環境条件や植生分布形状の違いが水質浄化機能に与える影響について議論することとする。

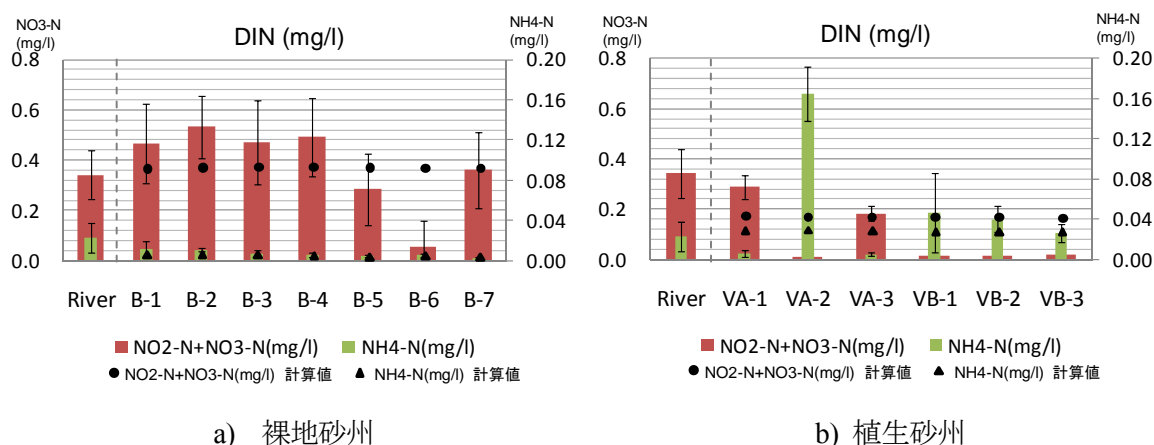


図-5.15 溶存無機態窒素濃度解析結果

## 第 5.5 節 河川水濃度および土壤環境条件を考慮した水質浄化機能評価

本研究では、砂州の伏流流動に伴う硝化・脱窒反応においては、砂州上に存在するモザイク状の景観要素に依存する土壤環境特性がその反応を律すると考えて、伏流水・物質輸送解析を行っている。そのために、景観要素に依存する環境因子として透水係数、溶存酸素量、溶存有機炭素および溶存有機窒素の 4 種類を抽出し、現地観測の結果から得られた各々の平均値を裸地域と植生域に与えることによって、砂州全体に空間分布させた。それらが、景観要素が有する脱窒反応のポテンシャルとなっている。そこで本節では、砂州の脱窒による水質浄化機能の向上に向けて、河川からの流入条件や土壤環境条件（ポテンシャル）の変化が、脱窒反応に与える影響を検討する。

### 5.5.1. 計算条件

解析領域と地形スケールは、前節での裸地砂州を対象として行った。まず、地形条件やポテンシャルを前節での値から変化させずに一定とした状態で、河川水濃度を変えた計算を行う。その後、各景観要素のポテンシャルとして抽出した透水係数、溶存酸素量、溶存有機炭素および溶存有機窒素の変化に対する脱窒速度への影響を検討する。

河川水濃度は、前節で示した各溶存無機態窒素濃度の値が初期値（ $C_{\text{NH}_4\text{-N}}=0.023(\text{mg/l})$ 、 $C_{\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}}=0.34(\text{mg/l})$ ）となっている。その初期条件から、全濃度を一率に 0.5 倍から 6.0 倍までの 5 段階変化させた。

硝化・脱窒反応は、主として土壤条件が酸化的か還元的かに依存して生じ、流動に応じた酸素供給速度と微生物活動による酸素消費速度とのバランスがその決定因子となる。本節では、酸素供給の支配因子として溶存酸素量を取り上げ、酸素消費速度の支配因子として溶存有機炭素を取り上げて、それらを一定割合で変化させた。溶存酸素量は 0.5～8.0 mg/l までの 5 段階で変化させ、溶存有機炭素は 0.3～3.0 mg/l までの 4 段階で変化させた。

### 5.5.2. 計算結果と考察

河川水濃度の変化に対する結果を図-5.16 に示す。河川水濃度の増加にともない脱窒反応は促進されるが、対数関数的な増加傾向である。この原因として、基質濃度は硝化・脱窒反応の制限因子ともなっていることによるものと考えられる。現在の解析条件では、溶存無機態窒素濃度が 2.2 mg/l 以上になると、脱窒に作用する微生物の働きを期待することは難しい状況であることが分かる。すなわち、濃度が閾値を超えると生態系の働きを介した自然浄化機能の効果は低減する可能性が考えられる。

土壤環境条件の変化に対する結果を図-5.17 に示す。ここでは、脱窒速度と DOC の関係を、DO を媒介にして調べた。溶存酸素量の制御に応じて土壤は還元的条件へと移行するため、脱

窒素脱窒反応の促進には適していることが分かる。溶存酸素量は脱窒反応の制限物質となっているため、特に 2.0 mg/l までの範囲内においては脱窒反応への寄与が指数関数的に減少する傾向が見られる。一方、溶存有機炭素が豊富に存在しているときには、微生物の活発な活動に伴い酸素消費が進み、脱窒作用は促進される。これら二者の挙動を合わせると、溶存酸素量が低く、溶存有機炭素が豊富に存在しているときに最も水質浄化機能の効果が上がるといえる。

その他にも、ポテンシャルとして定義した透水係数と溶存有機窒素を、初期値からそれぞれ 0.5 倍から 3 倍までの 3 段階変化させて、脱窒速度への影響を検討した。透水係数に対しては微増変化を確認できたが、溶存有機窒素に対しては変化が見られなかったため、本モデル解析上では二者による脱窒への影響はほとんどないと考えられる。

以上から、河川水濃度と土壤環境条件の変化が、脱窒反応速度に与える影響は、1 オーダーレベルの違いがある。そのことから、砂州上の土壤環境条件の管理は、砂州が有する水質浄化機能の強化につながる可能性が示唆された。

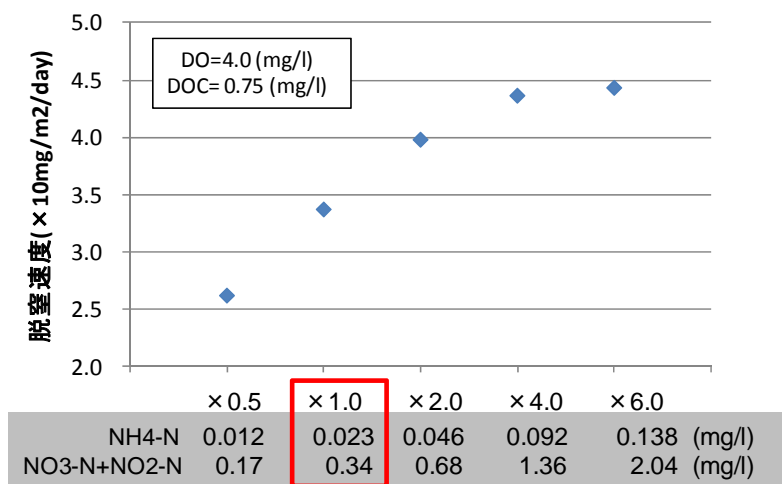


図-5.16 河川水濃度の変化による脱窒速度  
(図中赤枠は計算初期値)

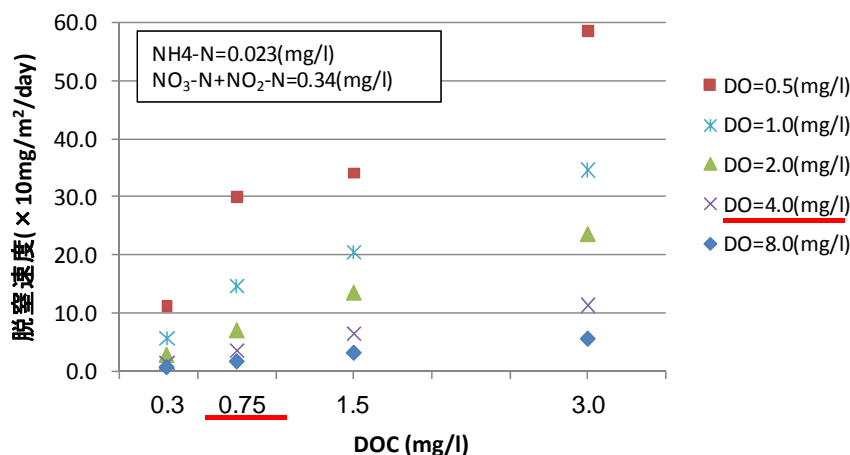


図-5.17 DO と DOC の変化による脱窒速度  
(図中赤下線は計算初期値)

## 第 5.6 節 砂州植生分布形状を考慮した水質浄化機能評価

前節では、砂州の裸地域でのパラメータを一定割合で変化させて、それらが脱窒反応に与える影響を検討した結果、土壤環境条件の違いが水質浄化機能を高める可能性が示唆された。実際の砂州上では、モザイク状に様々なパターンで植生が存在している。先述したように、植生の存在は有機物供給源であるとともに、微細土砂を捕捉して大気との遮断を進めたり、有機物の分解による酸素消費によって還元的な土壤環境を作り出している。つまり、植生の存在は局部的に土壤環境特性や水質形成過程を変化させている。そこで、本節では砂州上の植生分布形状を変化させて、それが脱窒反応に与える影響を議論するとともに、砂州上のどの部分において水質浄化機能が発現にしているのかを検討する。

### 5.6.1. 計算条件

解析領域と地形スケールは、前節での裸地砂州を対象として行った。植生分布形状については、図-5.18 に示す7ケースを準備した。Case1 では、砂州の有無がどのように脱窒へ影響を与えるかを見るため、Case2 では、植被率を 30%に固定した植生域の空間分布の仕方の違いによる脱窒への影響を見るための計算条件とした。

Case1-1 は、観測対象である矢作川の裸地砂州、Case1-2 は、Case1-1 の地形条件を保持したまま、全面を植生で覆われた場合とした。他方、Case2 においては、植生分布形状の考慮の際に砂州形状と植生繁茂についての関係性を調べた既往研究（河川生態学術研究会木津川グループ、2009）を参考に、砂州における代表的な植生分布を選定した。Case2-1 は砂州上流側に植生が繁茂する場合、Case2-2 は下流側、Case2-3 は堤防側、Case2-4 は水際部、最後の Case2-5 は砂州全体にモザイク状に植生が繁茂している場合を想定した。

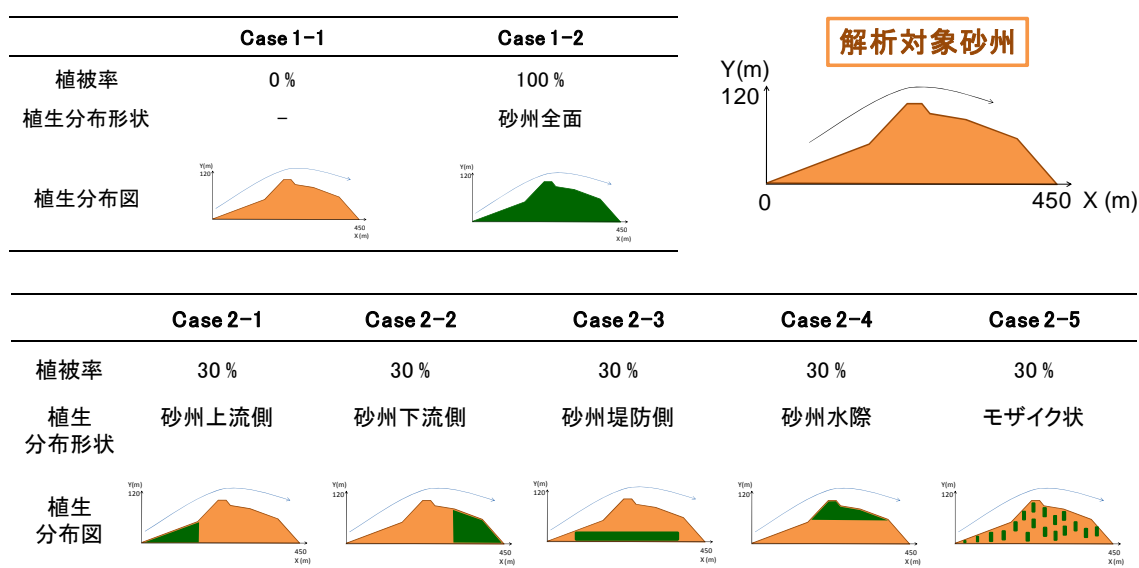


図-5.18 解析条件



### 5.6.2. 計算結果と考察

植生分布形状を変化させた結果を図-5.19 に示す。また、各ケースで脱窒反応が生起している場を図-5.20 に示す。

#### (1) 植生の有無による脱窒速度の違い

Case1 の二者を比較すると、植生のみ砂州では裸地のみ砂州より約 2 倍の脱窒速度を有することが明らかになると同時に、たとえ植被率が 0% であっても脱窒作用は少なからず働いていることが分かる。植被率での比較として、Case2-1 の植被率 30% を取り上げると、Case2-1 ~2-5 の平均的に 3 割増し程度になっているといえる。また、図-5.20 の脱窒量コンター図を見ると、Case1-2 と Case2-1 のいずれを見ても、植生の上流側で脱窒が活発に生起している。植生は、流れの抵抗となり、特に植生の上流側で微細土砂や各種物質を捕捉する。このため、砂州の上流側植生域では、さらに脱窒反応の助長が見込まれるものと思われる。なお、Case1-2 では下流に行くに従い、脱窒量が減少している。このことは、流れの経路に沿って基質物質が消費されるためと考えられ、伏流水のフラックスによる移流・分散が同じポテンシャルを有している植生域であっても、機能の発現に差異を生みだしていることが分かる。

また、各ケースで得られた脱窒速度を、干潟において調査された脱窒速度と比較をしてみた。本解析で得られた 33.7~58.8 (mg/m<sup>2</sup>/day) という値は、干潟域での既往研究において白旗ら (2001) が報告している値 13~236 (mg/m<sup>2</sup>/day) や清家(1986)が報告している値 15-22 (mg/m<sup>2</sup>/day) と比べて、オーダー的には等しいレベルにあることが明らかになった。

#### (2) 植生分布を考慮した脱窒能の比較

図-5.19 に示した Case2 の結果を見ると、同じ植被率であるにもかかわらず脱窒量に違いが生じていることが分かる。植生が砂州上にモザイク状に分布している場合が脱窒速度の最大値を示している一方、砂州の下流端に植生がある場合が最小値を示し、その差は約 1.0 (mg/m<sup>2</sup>/day) にのぼる。これらを図-5.20 のコンター図とともに考察すると、まず Case2-1 と 2-2 の違いは先述したように、基質物質の流程に沿った消費が考えられる。Case2-3 と 2-4 では、脱窒速度に大きな違いは見られなかったが、いずれも上流側が機能の発現には効果的であるといえる。脱窒速度が最大となった Case2-5 を見ると、砂州上に点在する小さい植生域の上流側で脱窒量が増加していることが、微小ながら確認できる。Case2-5 は、酸化的な裸地域と還元的な植生域が交互に存在しているタイプである。脱窒活性は、酸化層と還元層との境界付近で最も高まることを見出されており (上原, 1973・Reddy, 1975)、伏流水は非常に遅い流れであるため、境界付近で微生物反応が瞬時に進行する。そのような境界部が Case2-5 の条件では複数存在することが、まとまった一つの植生がある場合よりも脱窒量が高くなった要因であると推察できる。

### (3) まとめ

上述した結果によって、以下のことが明らかになった。

- ・砂州という場合は、たとえ裸地のみであっても、微生物反応に必要な環境因子が揃い、それらのバランスが整うことによって脱窒を担うことが確認された。
- ・植生域の有無は、砂州が担う脱窒量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発現していることが明らかになった。
- ・砂州の水質浄化機能を一つの環境指標とした場合、ひとつのまとまった植生を有する砂州より、小さな植生が点在する砂州の方が、浄化機能が低いことが確認された。

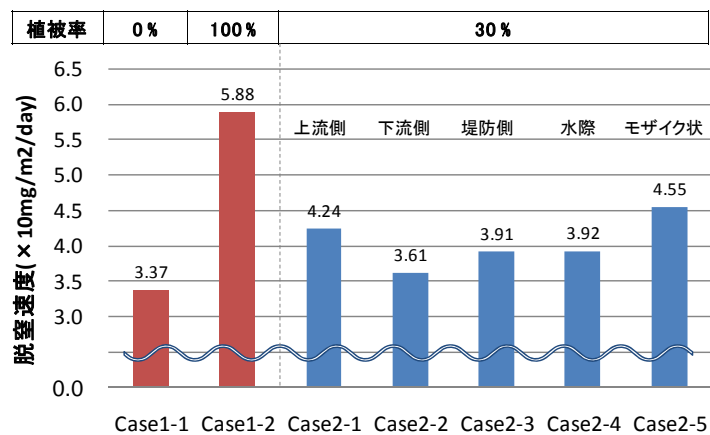


図-5.19 植生分布形状の違いによる脱窒速度

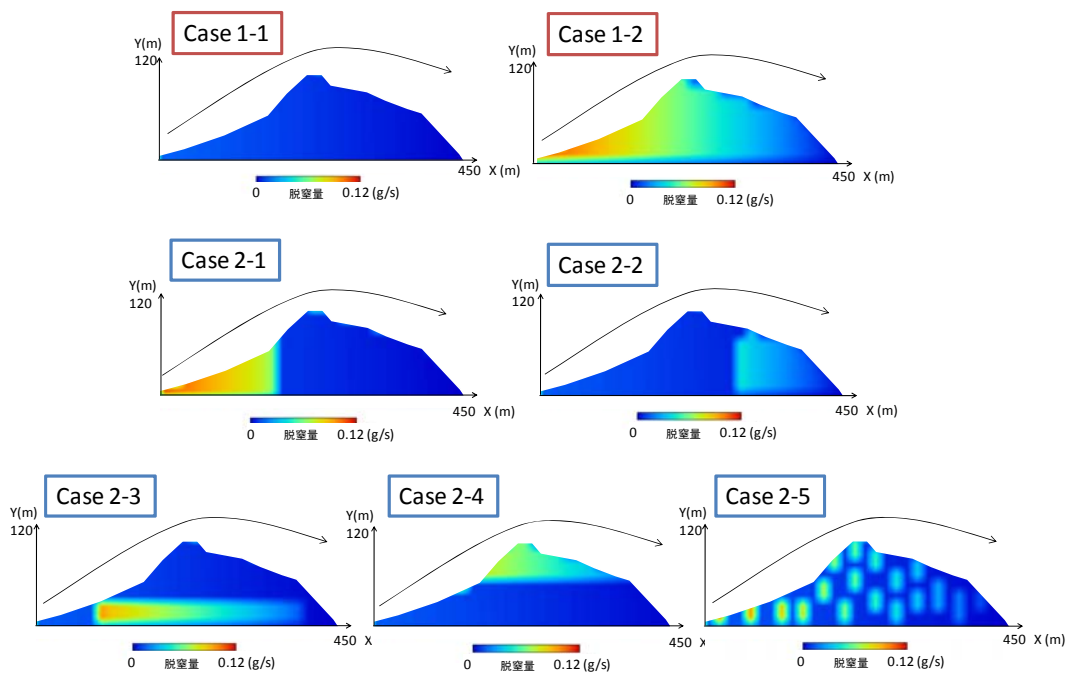


図-5.20 水質浄化機能の発現箇所

## 第 5.7 節 結語

本章では、砂河川砂州における平水時の水質浄化機能に着目し、平水時の水質浄化機能に着目し、現地観測と室内実験により得られたデータに基づいて、伏流流動に伴う砂州の水質浄化機能を定量可能なモデルを構築した。さらに数値解析により、その機能が土壤環境条件や植生分布によってどのように変化するのかを検討した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 各景観要素の土壤粒径は、裸地域は粗砂、植生域はシルト混じりの細砂から構成されており、粒径に依存する透水係数にも明瞭な違いが見られた。また、矢作川砂州の土層構造は、地上から約 0.7m 地点に伏流水面、約 1.4m 地点に粘土から成る難透水層が横断していることを確認した。
- 2) 伏流水質の結果から、裸地域と植生域では、ORP, DO, DOC, 水温や pH などの水質浄化に関与する環境因子に特徴的な違いが見られることが明らかになった。特に、植生域は還元的な環境であることに加えて、脱窒菌の活動を促進する条件が整っていることが示唆された。
- 3) 数値モデルによる検討の結果、河川からの流入水質濃度が閾値を超えると、生態系の働きによる水質浄化は機能の働きが鈍化する。また、土壤環境条件としては、溶存酸素量が低く、溶存有機炭素が豊富に存在しているときに最も脱窒反応の効果が高いといえる。
- 4) 砂州は、たとえ裸地のみであっても、微生物反応に必要な環境因子が揃い、それらのバランスが整うことによって水質浄化機能を担うことが確認された。
- 5) 植生域の空間的分布形状の違いは、砂州が担う脱窒量に差異をうみだすとともに、特に植生域上流側でその機能が発現していることが明らかになった。また、砂州の水質浄化機能を一つの環境指標とした場合、ひとつのまとまった植生を有する砂州より、小さな植生が点在する砂州の方が、浄化機能が高いことが確認された。

なお本研究では、解析において必要となる生物生理活動速度や化学反応速度といった物質変換速度に関する測定データは直接的に得られなかったため、その大部分を文献によって設定した。現段階においては質・量ともにそれらの十分な実測データが存在していないため、今後さらなるデータ収集が望まれる。

## 参考文献

- 上原洋一：水田土壌作土表層部における硝化脱窒過程に関する研究（第1報）湛水状態下長野土壌各層別の酸化還元状態の変動，窒素の形態変化および硝化菌・脱窒菌の消長，土肥誌，Vol.44, pp.463-470, 1973.
- 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，2011.
- 尾花まき子，安佛かおり，辻本哲郎：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，河川技術論文集，Vol.16, pp.471-476, 2010.
- 片貝武史，亀井丈史，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.
- 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□，pp.7-13, 2009.
- 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.
- 白旗清伸，吉田浩義，中井智司，細見正明，村上昭彦：河口域の干潟における脱窒能の評価，水環境学会誌，第24巻，第11号，pp.773-777, 2001.
- 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.
- 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.
- 清家泰：汽水湖・中海における窒素代謝□-夏期における底泥表層部での脱窒特性，陸水学会誌 Vol.47, pp.133-141, 1986.
- 宗宮功：自然の浄化機構，技報堂出版，pp.164-168, 1990.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 長谷部亮：水田圃場における硝化脱窒に関する研究-特に酸化層・還元層の分化とアンモニア酸化菌の生態について-，北陸農業試報，32，pp.123-170, 1990.
- 千種薫：微生物による水質管理，産業用水調査会，pp.52-68, 1996.
- 矢作川水系河川整備計画，中部地方整備局，2009
- Ficher, S.G. and G.E. Linkens: Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: An integrative approach to stream ecosystem metabolism, *Ecological Monographs*, 43, pp.421-439, 1973.
- Hynes, H.B.N.: Groundwater and stream ecology, *Hydrobiologia*, 100, pp.93-99, 1983.
- 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.
- Jeremy B.J. and P.J. Mulholland: Streams and ground waters, pp.154-165, 2000.
- Reddy, K.R. and W.H. Jr. Patrick: Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential loss in a flooded soil, *Soil Biol. Biochem.*, 7, pp.87-94, 1975.
- 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.



## 第6章 結論

### 第6.1節 各章の研究成果

本論文は、流域圏における自然共生型シナリオを想定した環境管理の視点から、特に河川砂州景観に着目し、各景観要素の役割を認識した上で、それらの総合化へ向けた評価手法の構築を試みたものである。本論文を取り纏めるにあたり、各章で得られた成果を以下に示す。

第1章では、「流域圏」における管理や研究の変遷を論じながら、流域圏管理の中で、生態系保全における重要空間としての河川に着目し、河川生態系の保全に関する従来の研究や取組の発展を整理した。その中から課題を明らかにした上で、本論文の方向性と目的を述べた。

第2章では、始めに環境の変質とともに進化してきたアセスメントの仕組みを概観した後、流域圏環境管理技術の中で必要となる概念の整理を行い、その概念に基づいて構築した流域圏アセスメント技術体系を紹介した。自然共生型シナリオにおける持続性確保の考え方や流域圏のような広域的スケールを扱う上においての課題であった空間的階層性を意識した論理体系を明確にするとともに、その技術を用いたシナリオ分析による戦略的な施策提案への道筋を示した。この中で定義された「流域圏」とそれを構成する各景観の役割（「フラックス変化」と「生態系サービス」を生み出す場）などの考え方は、第3章以降での河川生態系評価を行うに当たっての基本コンセプトとなっている。

第3章では、砂床河川の交互砂州を有するセグメントを対象に、はじめに河川生態系を評価する上で重要となる「河川景観」や「河川生態系の構造と機能」、「生態系サービス」などの基本概念を、既往文献を踏まえながら整理を行ったうえで、本研究におけるそれらの捉え方を論じた。さらに、既往の生態系機能評価手法を概観した後、上述した概念整理に基づいて、砂河川交互砂州形成区間の砂州景観評価手法の枠組みを構築した。「砂州景観解析」、静的な景観のポテンシャルを扱う「生態系機能ポテンシャル評価」、動的なフラックスへの考慮が必要な「水質フラックス制御機能の評価」という3パートに分類した上での評価が有効であることを示した。

第4章は、前章で分類したうちの「景観解析手法による砂州景観分類」と「生態系機能ポテンシャル評価」を受け持つ。「景観解析」のパートでは、航空写真、横断測量データや流況データという簡単に入手できる情報を用いて、景観分類図を作成することにより、河道を構成している様々な景観要素の時空間分布特性を定量的に把握する手法を構築した。河川環境管理にお

いて、河道の変遷を知ることが重要であるが、過去を再現する情報は限られている。本手法は、他河川においても上述した3種類のデータを用いて河川景観および変遷を定量できるため、河川環境管理において有用な手法であるといえる。また、流況に応じた水位変動を砂州が冠水するエリア（冠水帯）として、景観分類の中に取り入れたことも特徴である。

「生態系機能ポテンシャル評価」においては、環境の評価指標として①生物の生息適性と②物質循環の素過程の卓越性から成る10種類の「生態的機能」を抽出し生息適性に応じてレベル分類を行ったうえで、それらの重み付き生息利用可能面積（WUA）を算出した。それにより、河道内の各砂州が有する生態的機能の空間分布と過去30年におけるその変遷を捉えることが可能となった。本手法では、蓄積された研究成果を踏まえながら、水位変動を表す「冠水帯」を景観分類に導入したことから、「生態的機能」としての生物種の特徴をより反映できる仕組みとなっている。

第5章では、砂州景観評価枠組みのうちの、動的なフラックスへの考慮が必要な「水質浄化機能評価」を受け持つ。ここでは、平水時の水質浄化機能に着目し、現地観測と室内実験により得られたデータに基づいて、伏流流動に伴う砂州の水質浄化機能を定量可能なモデルを構築した。さらに数値解析により、その機能が土壌環境条件や植生分布によってどのように変化するかを検討した。水質浄化のうち「真の浄化」といわれる脱窒作用にとっては、特に脱窒菌の存在が不可欠である。現地観測結果により、特に植生域は還元的な環境であることに加えて、脱窒菌の活動を促進する条件が整っていることが示唆された。また、数値解析での検討の結果、土壌環境条件としては、溶存酸素量が低く、溶存有機炭素が豊富に存在しているときに最も脱窒反応の効果が高いこと、また、たとえ裸地のみであっても、微生物反応に必要な環境因子が揃い、それらのバランスが整うことによって水質浄化機能を担うこと、砂州の植生域上流側で機能の発現が活発であり、かつ植生域が砂州上にモザイク状に散在している方が一つのまとまった植生域を有する砂州より高い機能を担う、という結果が得られた。

以上から、河道内砂州は脱窒作用による水質浄化機能を持つことが明らかになっただけでなく、砂州の土壌条件や植生分布を考慮した機能評価手法を構築できたため、砂州の景観特性を反映した水質浄化機能評価が可能となった。

## 第6.2節 砂州景観の生態系保全戦略へ向けて

第3章にて構築した砂州景観評価手法の枠組みをもとに、「砂州景観解析」、静的な景観のポテンシャルを扱う「生態的機能ポテンシャル評価」、動的なフラックスへの考慮が必要な「水質フラックス制御機能の評価」という3パートに分類した上での具体的評価を、第4章、5章で示した手法を用いて試みた。

第4章では、「生態的機能」という指標を用いることにより、曖昧であった砂州景観が有する環境機能の定量化が可能となった。ここでは、既往研究を用いた予測に基づき、生物が利用可



能な場所や物質循環機能が生起可能な「ポテンシャル（潜在性）」を示している。そのため、実際には指標とした生物が生息しておらず、また物質循環の素過程が作用していないこともあり得るが、その場合他の景観に比べてポテンシャルが高い景観は、比較的容易に「生態的機能」が復元できる可能性のある場であるといえる。そのため、これらのデータをもとにした砂州景観の実状との比較により、ポテンシャルがあるにも関わらず「生態的機能」が発現していない場では、その理由を思案した上での環境改善案の戦略的な提案が可能となる。また、過去からの機能の変遷を見て、その河川にとって重要な機能が著しく低下しているならば、それを保全するような施策や過去のある時点での機能評価値を機能の回復に向けた目標として設定することも可能となろう。その際、本手法では景観と機能を関連付けて評価しているため、機能の回復・復元の議論は、河川景観管理施策に直接反映できる。さらに、この評価によって明らかになった機能の高い砂州の景観構成を手本に、他の砂州の景観管理を行うといったことも考えられる。

一方、第5章の「水質浄化機能評価」では、「真の浄化」といわれる脱窒作用を取り上げ、それぞれ特徴的な景観が保有する「潜在性（ポテンシャル）」と、その時その時の表流水や伏流水などの水理・水質環境によって具体的に機能が発現する「フラックス」という異なる発現機構に着目し、特に後者の評価に重きを置いた。表流水や伏流水の流入により実際に生み出される結果としての脱窒量を砂州の景観要素の配置を考慮して評価できる仕組みのため、機能が発現している場や水質浄化機能が高い砂州は保全優先場となるだろう。また、機能発現の向上のためにフラックスを整備することや植生管理に関わるその分布形状を提案することも復元の手法となる。

上述したように、構築した評価手法により得られた結果を用いて、保全戦略策定に向けた展開を論じた。既存の入手容易な情報を用いながら、環境という定性的なものを「景観」という概念を用いて科学的に定量化し得る手法を構築できたことは、環境目標や保全戦略を考える上においての基礎情報を提示できるため非常に有用であるといえる。また、「景観」には、①視覚的な物理情報を重視した見方（ポテンシャル型）、②要素ごとの連結性を重視した見方（フラックス型）、そして③それら二つが繋がることにより「生態系」そのものとみる見方といったように、同じ「景観」という言葉でも使い方によって見方が異なることが本研究により明らかになった。

### 第6.3節 今後の課題

本論文では、河川環境管理に対して、生態系機能は特徴的な場に固有のものであるという認識の下、生態系機能を評価指標とした際の景観からのアプローチを提案し、主にリーチスケールを対象として評価手法を構築してきた。はじめに、第4、5章の手法開発に際して残されている課題を述べる。

第4章での景観解析手法を用いた生態系機能評価では、蓄積された数多くの研究成果を環境指標として抽出し、景観分類図という統一の基盤上で総合的に取り扱ったため、景観分類の中では考慮できなかった小出水による微地形形成や分級、フラックスによる景観の連結性がこの中では配慮できていない。例えば、鳥類などは生活史に応じて営巣場と採餌場を使い分けるためそれらは隣り合う必要がある上、採餌場には餌となる昆虫の存在が必須となり食物網への着眼も望まれる。また、営巣の際には擬態できる粒径サイズが必要であるため、粒度組成が営巣を規定する条件となる。このように、微地形と生物の生活史に関連した評価にまでは至っていない。また、出水による微地形の更新期間などの時間スケールに対する評価軸への入れ込みについても考える必要がある。

第5章では、物質循環機能の脱窒作用に焦点を当て、場のポテンシャル値を規定した上での伏流流動に伴う脱窒量を概略的に算定している。その際の物質変換過程における実測データは、現段階では質・量ともに不十分であるため、基盤情報としてのさらなるデータ収集が望まれる。

本研究での検討では、リーチスケールを対象として生態系機能が発揮される仕組みを、景観特性に応じて詳述した。しかし、河川管理において治水・利水目標に伍して環境目標が議論されるためには、セグメントスケールでの河川環境の理解が望まれるところでもあり、今後はリーチスケールでの検討をセグメントスケールへ展開するための手法や論理体系の構築は必要となってくる。さらに、自然環境は個々の要素が複雑に相互に関係し合い、全体として安定した巨大なシステムを成している。本研究では、個々に蓄積されている河川生態ひいては自然環境に関する多大な研究成果や情報を、Tool Box 2として取り纏め、流域圏スケールへ反映し、コンセンサスが得られた評価軸に基づいて統合化する流域圏環境の評価枠組みを構築し、それらの個別研究を事例として示した。自然環境をシステムとして捉えて総合化していく手法の構築とそのような視点は、持続的な社会の形成に向けて、今後重要になってくると思われる。それは複雑かつ難解であるが、それゆえに挑みがいのあるものでもある。

## 謝辞

本論文を取り纏めるにあたり、終始一貫して丁寧に御指導いただいた名古屋大学大学院工学研究科教授・辻本哲郎先生に衷心から感謝の意を表します。流域圏という新しい舞台を前に、右も左も分からなかった私を、常に大局的な視点から温かく見守って頂き、適切な方向へと導いて下さったこと、研究や仕事に対する様々な素養を厳しく御教示頂いたこと、また様々な分野の方々と出会う数多くの機会を与えて頂いたことなど、先生への感謝の念は測り知れません。河川流域を軸とした健全な社会基盤形成に向けた確固たる信念と実行力のともなった想像性をもって常に進化される先生に、何とかついていこうと我武者羅に進んだ5年間の中で学び得たことを胸に、今後も日々精進して参りたいと存じます。

岐阜大学流域圏科学研究センター教授・藤田裕一郎先生、名古屋大学大学院工学研究科教授・水谷法美先生には、副査として有益な御助言を頂くとともに本論文の細部にわたり御指導を頂きました。ここに深謝の意を表します。

名古屋大学大学院工学研究科准教授・戸田祐嗣先生には、懇切丁寧に御指導頂き、現地調査や数値解析手法などご教授頂きました。研究室生活における日頃の有益な御討論が大きな励みとなっただけでなく、物事の本質を瞬時に捉えた上で論理的に研究を展開される姿から学び得た事が、今後の「夢」へと繋がることを確信しています。ここに記して深く御礼申し上げます。

名古屋大学大学院環境学研究科准教授・田代喬先生には、数多くの御助言・御指導を頂いたのみならず、柔と剛を併せ持った真摯な研究姿勢からたくさんの事を学ばせて頂きました。また、実験を実施するための充実した環境を整備して頂きました。心より御礼申し上げます。

株式会社建設環境研究所・片貝武史氏には、砂州の水・物質輸送特性について重要な御助言を頂くとともに、研究室生活全般にわたって常に気にかけて頂いた事が大きな心の支えとなりました。広島大学大学院工学研究院助教・椿涼太氏、立命館大学理工学部環境システム工学科講師・佐藤圭輔氏と昼夜を問わず交わした真剣な議論は忘れ得ません。名古屋大学大学院工学研究科研究員・安佛かおり氏、高岡広樹氏の多大なる御支援と御協力を無くして本論文は成り立ち得ないものでした。記して深く御礼申し上げます。

本研究は、文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクトの一環として実施させて頂きました。研究メンバーの方々との熱心な議論や交流によって、物事の本質の捉え方や追究の仕方など多くの事を学ばせて頂き、研究を進める上での活力となりました。また、国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所および近畿地方整備局淀川河川事務所には、研究を進める上で必要不可欠な様々なデータや河川に関わる情報を快く御提供頂くなど親切に対応して頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

水質分析に際して、東京理科大学理工学部土木工学科准教授・二瓶泰雄先生、山口大学大学院理工学研究科准教授・赤松良久先生には、貴重な分析機器を快く使用させて頂きました。心より御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、現地調査や実験をお手伝い頂くなど多岐にわたり御支援・御協力を頂いた辻本研究室の皆様には深甚の謝意を表します。特に、研究室卒業生の竹下幸美氏、井上佳菜氏および在学生の野尻晃平氏の一方ならぬ御努力と熱心な御協力があったからこそ、本論文を取り纏めることができました。山森文さん、宇佐見良恵さんには研究室生活を送る上で多大なる御支援と励ましを頂いた事を記すとともに、心より御礼申し上げます。

また、研究を進める過程で、学会や研究会など様々な場面にて御支援、御協力を賜りながらここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に感謝申し上げます。

最後になりましたが、如何なる時も常に私を応援し、励まし、たくさんの笑いとともに支えてくれた家族、そして友人たちに心より御礼申し上げます。