

自然共生型流域圏管理のための 生態系影響評価への水工学的アプローチ

HYDRAULICS SUPPORTING ECOSYSTEM ASSESSMENT FRAMEWORK FOR ECO-COMPATIBLE RIVER BASIN MANAGEMENT

辻本哲郎¹・戸田祐嗣²・尾花まき子³
Tetsuro TSUJIMOTO, Yuji TODA and Makiko OBANA

¹フェロー会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
²正会員 博(工学) 名古屋大学大学院工学研究科准教授 社会基盤工学専攻
³正会員 MSCE 名古屋大学大学院工学研究科研究員

In Japan, metropolis is often located surrounding a bay to which multiple river basins are facing, and such river basin complex is a target of sustainable land management. River basin is a unit of hydrological cycle which drives fluxes of water, sediment and biophilic elements and supports the ecosystem, and eco-compatible river basin management may contribute to the sustainability. From such a viewpoint, a research to establish assessment framework with ecosystem-service concept as an index of sustainability has been conducted. At first, a river basin has been recognized as an assembly of flux net work. Secondly, the structure and functions of ecosystems are studied, and it is recognized that ecosystem in a river basin plays a role to change the fluxes and to bring ecosystem service. Assessment is composed of two parts: flux net work analysis and evaluation of both flux change and ecosystem service. As for the latter, we have introduced a concept of categorized landscape where the mechanism to bring ecosystem service and flux change is similar and approaches based on hydraulic engineering are feasible and powerful.

Key Words : *River basin complex, eco-compatible management, ecosystem assessment, flux net work, biophilic elements cycle, ecosystem service*

1. まえがき

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た状況で、「持続的発展」が標語となり、自然共生型はそのひとつのシナリオとして注目されている。わが国では、自然と共生した人間の営みによって「風土」を醸成してきたが、その喪失の回復も国土形成計画¹⁾のひとつの柱になってきた。著者ら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(2006～2010年度)^{2),3)}の中でその根幹となるアセスメント技術開発にかかわるサブテーマを分担し、これまで「生態系サービス」によって流域圏の持続性評価を測る手法の開発につとめており^{4),5)}、とくに水工学的アプローチで生態系を扱う手法などを体系化したアセスメントの枠組を概成した。本論文ではそれを紹介する。

2. 自然共生型流域管理とは

持続可能な国土管理を目指すとき、「生態系サービス」を享受するという「自然共生型」は、流域において、流域水循環が駆動するフラックス網がさまざまな景観を通過して生態系サービスを生み出していることに着目すると、もっとも効果的なシナリオである。というのは、流域は水循環の(水循環全体としてはグローバルな水ではあるが)陸側の単位であり、降水が流出(runoff)というかたちで、流域の中で閉じた自然のフラックス網を形成している。そしてその水が流砂系を駆動し、流域内の多くの(とくに人間活動が活発に展開されている)水成地形を作り出してきた。水、土砂の経路である河川水系は水・土砂のフラックス網の最も動的な部分を受け持っている。このフラックス網の輸送量の時空間変化は人間と大きくかかわっている(治水・利水や、河川地形動態や

土砂災害). この水・土砂とともにさまざまな物質が輸送されているが、とくにここでは生元素に注目しよう。酸素、炭素、窒素、リンなどの生元素はさまざまに形態も変化する。大きくは、無機物にも有機物にも、そして生体(biomass)ともなりうる。そのため生物的側面とも大きくかかわり、流域内で水循環に駆動されるものとして、流砂系のみならず、物質循環、生態系にも及んでいる。とくにわが国は大陸に比べ、気候的、地形的条件から、「流域」内のコントラストがはっきりしており、流域でのこれらの系の働きが顕著で、われわれは古代からこれらと、すなわち自然(の系の活性)とうまく共生しながら社会経済活動という人間の営みを行い、「風土」を形成してきた。つまり、風土はまさにその単位が流域である。流域は水、土砂、物質のフラックス網で、流域のさまざまな場所(地先)で、風土(水循環、流砂系、物質循環、生物相が形成する景観、本研究グループではこれ全体を「生態系」と呼ぶことにしている)がもたらす恩恵を享受する仕組みによって社会を構成してきた。この恩恵を以下では「生態系サービス」と呼ぶ。「生態系サービス」については、Constanzaら⁶⁾によって整理され、また統合的勘定のため貨幣価値換算されることが注目されているが、ここではあえて、個別の恩恵を「生態系サービス」と呼ぶ。こうした議論から、自然共生シナリオを議論するうえで「流域」を単位とするのは当然のこととなる。

その後、風土の直接的利用には限度があり、人工的な開発行為が、その容量(capacity)を超えることを可能にし、社会経済発展を確保してきた。それは、先述の自然のフラックス網に人工的なそれらを加えることであり(上下水道や灌漑・排水路など、さらには食料などを輸送する鉄道・道路と輸送手段)、また自然の仕組みを(高エネルギーを投入することによって)効率的に代替する施設を流域系に加えることであった。

図-1は、流域が河川水系に代表される自然のフラックス網で形成され、各地先で景観に応じたさまざまな恩恵(生態系サービス)が生み出されている状況を示す。さらにこうしたサービスを追加あるいは代替する施設が整備され、また人工フラックス網が付加されている状況を示している。こうした人工の系は画一的であるため、わが国の流域の各場所固有の風土を喪失させてきたともいえる。

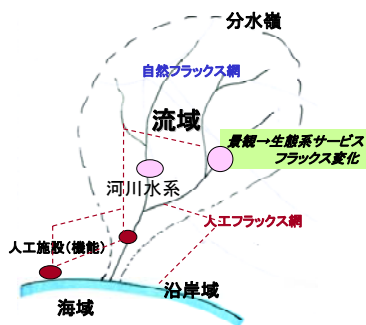


図-1 流域とフラックス網および地先景観

これまで述べてきた自然共生型流域管理の基本的な考え方は、エネルギー負荷の高い人工フラックス網の運用や施設依存型を、再度自然フラックス網の活性化と自然景観がもたらす生態系サービス享受型に置き換えようとするものである。それによって、たとえば化石燃料依存が是正されるであろう(ポテンシャルを有する)ことから、「持続度」の高いシナリオといえる。

3. 流域から流域圏へ

前章で流域が「生態系を軸に考える環境管理の単位」であるとしたが、分水嶺を境界とする地理もしくは水文学的流域では、沖積平野の氾濫原や、洪水の氾濫域、利水の配水域等水循環の影響を受ける領域をすべて含まないため、これらを包含した領域まで「流域管理でいうところの流域」の範囲を広げることが多い。また、流砂系を考えると、河川流砂が海岸や沿岸地形を支配することから、海岸や沿岸域をもしばしば流域に含めるための議論がされる。さらに、前章でも述べたように、人工フラックス網は管理域を拡大させる。それは都市域では顕著である。とくに三大都市圏に代表されるように湾域を囲んで都市域が発達、複数の流域が湾域の水環境・生態系と密接に関係し、かつ陸域でも先に述べたような人工フラックス網による密接なつながりがある(図-2参照)。こうしたことから、これらを複合した空間と捉えた「流域圏」概念が出てくる。湾を囲む複数流域および湾を共有する「流域圏」は大都市圏のひとつの姿ともいえる「典型」である。伊勢湾流域圏研究⁹⁾ではまさにそこでのアセスメント技術⁵⁾を軸に持続可能な国土経営のための環境管理を実現しようとするものといつてよい。なお、流域圏の陸域からの影響は湾域への流入フラックスの変化として与えられ、それと外洋からのフラックスに影響される湾域水環境と沿岸域生態系(水産資源を含む)は相互関係の強い間柄である。

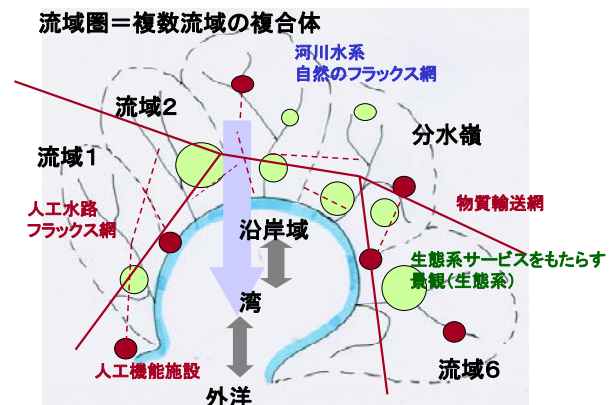


図-2 湾を囲む大都市圏を包含する流域圏

4. 生態系の構造と機能

本研究では、流域の中ではぐくまれる景観は水循環、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の結果形成されるもので、それをまさに「生態系」と呼ぶことにしている。かつては、物理基盤を境界条件とした生物相あるいは一歩進んで生物相と物質循環との相互作用系を生態系と見る見方が多かったが、1996年以降の、生態学、河川工学、陸水学の学際連携による河川生態学術研究⁷⁾などの進展⁸⁾により、とくに物理基盤の動的な環境である河川域での研究成果は、生態系が、「物理基盤、物質循環が生物相と相互に関係した系」であるとの定義に傾かせているようだ。河川生態学術研究のなかでも木津川グループではとくに河川生態系の構造と機能という視点から、物理基盤、物質循環、生物相の相互作用に着目した研究を進めており、図-3のような仕組みに整理している⁹⁾。これは、生態系を含む河川管理を、水工学的技術を利用して行うのに都合よくまとめられたものといえる。

図-3は物理基盤、生物相、(生元素の)物質循環の相互作用系としての生態系の構造を示したものである。物理基盤は、水流、流砂、地形・植生の相互作用であり、また、生物相も個体の成長や繁殖、それにかかわる食物連鎖、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・分解などで相互にかかわっている。景観管理という視点では、物理基盤の生息場提供、物質循環の素過程(捕捉・貯留・流失、硝化・脱窒など)の生起場の提供といった生態的機能(ecological function)が注目され、また水工学の支援が力を発揮する側面である。

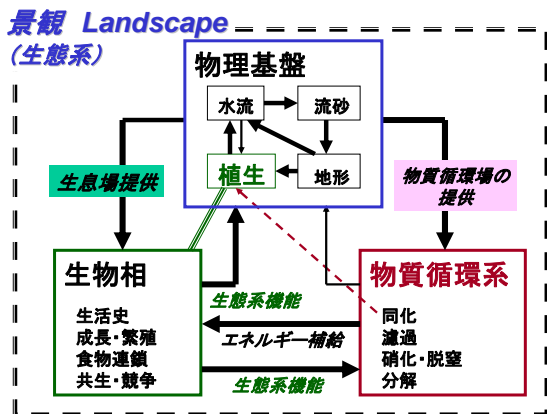


図-3 生態系の構造と機能

5. 流域の中の生態系・景観の役割

流域あるいは流域圏の中にはさまざまな景観があり、そこでは生態系が形成されている。かつ、流域はフラックス網そのものであり、生態系-景観の存在は、そこで何らかのものを生み出している。例えば生息場は生体量(population-biomass)を生み出し、物質循環はフラックス変化をもたらしている(場合によってはその変化量は生体量にも依存している)。生体量やフラックス変化はその地先にもたらされるもので、場合によってわれわれはそれを生態系サービスESとして享受する。一方、フラックス変化はフラックス網によって流域全般にわたって伝播する(図-4参照)。

こうしたさまざまな地先での生態系の特徴が捉えられ、定量的にはフラックス変化と生態系サービスとして評価されることが、流域全体にわたる環境評価に必須である。

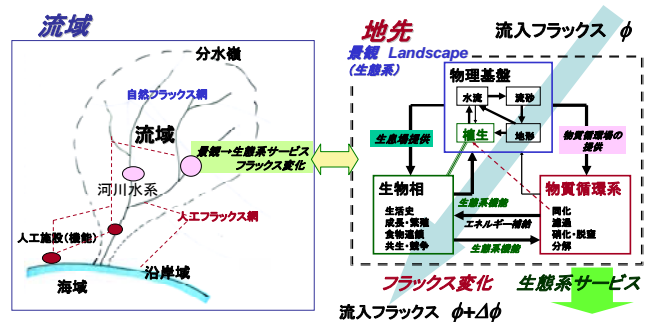


図-4 流域と個々の景観の役割

6. 類型景観の概念導入-個別性と普遍性

生態系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、さまざまなところでのフィールド研究が中心であったが、河川生態学術研究など工学^{7) 8)}との学際連携の中で図-3のような生態系の普遍構造も議論されるようになってきた⁹⁾。例えば、木津川下流をフィールドにする木津川研究グループは交互砂州を伴う砂河川の一般的特徴、多摩川では流況が厳しく調整されている礫床河川、千曲川では攪乱がなお残る礫床河川の生態系が研究されているという風に、類型化して見る。つまり、木津川下流部に限定しているのではなく、砂河川で交互砂州を伴うセグメントの一般的特徴を見出そうとするもの(それゆえ、そこでの地先でのフラックス変化や生態系サービスの定量的評価手法は、同じセグメントに属する他河川の部分にも適用できるという汎用性(普遍性)を持っているということ)である。その意味で、セグメントは河川で生態系を見る(生態系を定量評価するツールを共通化する)「類型景観」である。

生態学者と工学者が連携する研究グループではこうし

た理解で生態系を評価しようとする試みがスタートしている。たとえば、木津川下流部(の交互砂州を伴う砂河川セグメント)では、セグメントを代表する骨格構造 Structure, その細部構造である Texture, それらの寿命時間あるいは更新時間としての Duration をキーワードとした(STD論)検討の規格化が始まっている¹⁰⁾。ここでは、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マイクロなスケールのサブ景観(ここでは Texture レベル。すなわち水域でも本流の瀬・淵、二次流路など一時水域、また陸域では裸地(礫帯や細砂マウンド)、植生域(草地、樹林域)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 Texture レベルのサブ景観(あるいは景観要素)が、さし当たって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¹¹⁾。

流域においても、こうした景観のスケールの階層性が着目される。河川水系での議論をベースにセグメントの線スケールを面スケールに拡張した「類型景観」を想定し、類型景観ごとに生態系の典型像を描き、流域内でこうした類型景観の属する地先をフラックスが通過するときのフラックス変化と生態系サービスを評価するツールを開発しようとする方法である。ここで、「類型景観」は、水成地形(河川沿いの土地)は河川のセグメントの背後地として捉え、それ以外は基本的に自然地形分類によった。さらに人的影響を土地利用形態(自然域、生産緑地、都市域)で区分した。図-5に示すように、例えば、自然地形区分である扇状地は、そのなかで自然域、生産緑地、都市域というように3つの類型景観へと分かれる。また河川域も、ダムや取水堰設置で影響を受けるため、同じセグメントでもその前後を異なる類型景観と見る。

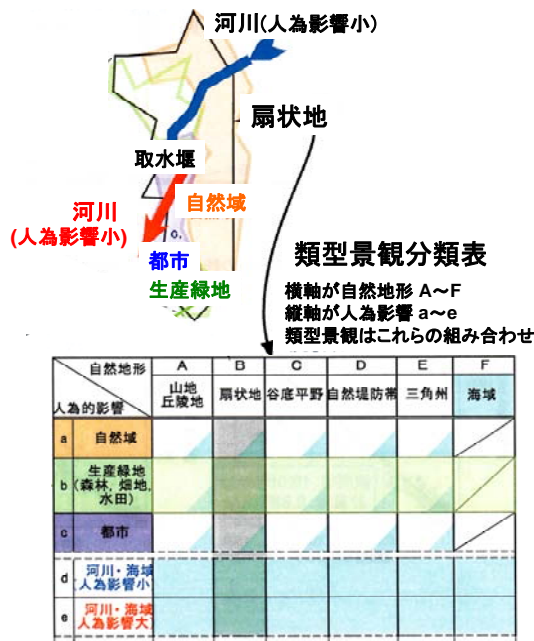


図-5 類型景観区分

なお、ここで定義する類型景観は河川で言うセグメントスケールのレベルであり、例えば「自然堤防帯氾濫原の生産緑地」という類型景観の中に、Texture レベルのサブ景観として、水田、茶畑、住宅地などがある。これらを考慮して、そこを通過するフラックスによるフラックス変化、生態系サービスなどを算定することを期待している。

このように、類型景観分類を行うと、そこで注目すべきフラックス ϕ 、自然共生型化での課題、考えられる施策等々が想定される。そして、類型景観に応じて生態系がモデル化(図-3にもとづく定式化)され、注目すべきフラックス変化 $\Delta\phi$ 、生態系サービス ES を求めるツールが準備されることになる。

7. 類型景観ごとの生態系モデル

地先ごとに生態系の作用によるフラックス変化、生態系サービスを評価できるモデルを作成することが必要になる。つまり図-3に示した相互作用系からなる生態系構造を次のように簡略化し、それに基づいてこれら进行评估する仕組みの一般化をはかる。類型景観分類は、その手法を類型景観ごとに共通化しようとするものである(図-6参照)。

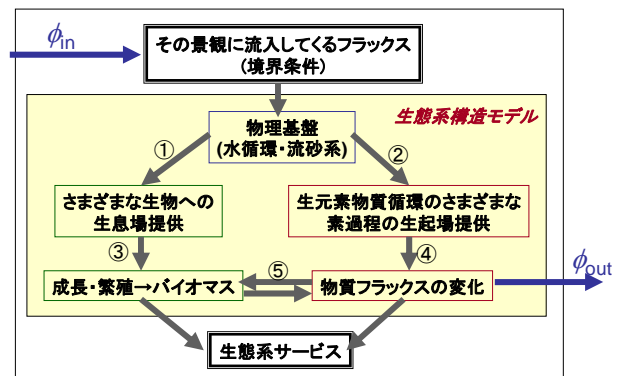


図-6 地先ごとの生態系機能の評価

図-6において、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¹²⁾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、サブ景観ごとにそれを適用し、サブ景観ごと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サブ景観ごとに評価し、サブ景観面積比率を重みとして各過程ごとに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。こうした手法

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¹¹⁾。こうして評価されたポテンシャルにもと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であるが、③については一部PDM(Population Dynamics Modeling)の手法の適用が始められている(付着藻類¹³⁾や底生生物¹⁴⁾について)。④についても部分的には評価できる手法が開発されている。ただし、③、④については先述のように、⑤バイオマス変化とフラックス変化の相互作用の評価が必要で、たとえば付着藻類繁茂のための栄養塩吸収や、剥離による有機物濁質の増加など、いくつかの現象について個別的研究¹³⁾がされており、その援用が期待されている。

この部分は、物理基盤情報図(例えば地形図、流速分布、水深分布、冠水頻度分布など空間分布情報)から生息域分布図や生元素物質循環の素過程生起場の空間分布図、それらから生体量の空間分布図やフラックスの変化量の空間分布図、そしてさまざまな形態の生態系サービスの空間分布図への写像手法の開発とよいてよい。ここで開発されるツールボックスでは、こうした写像関数が類型景観ごとに普遍化されていることが要求される。

8. アセスメント枠組みの構築

これまで述べてきた考察から、流域圏環境管理における自然共生度を評価するアセスメント枠組みとして図-7にフローチャートとして示すものが描ける。

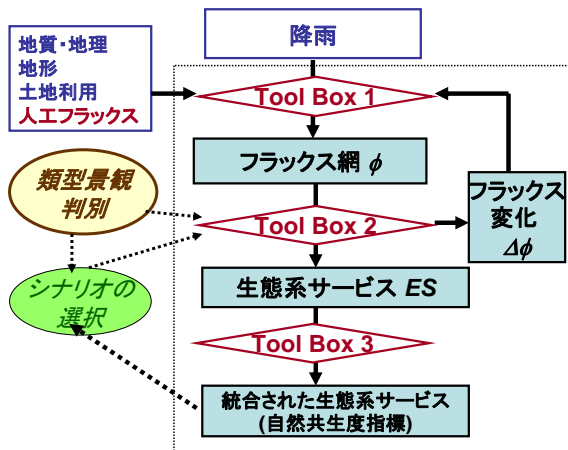


図-7 自然共生度アセスメントの枠組

全体の解析枠組みは以下のとおりである。まず、降水条件に対して流域全体の(1)フラックス網解析(水、土砂、さまざまな物質)を行う。この手法としてをTool Box 1を準備する。次に、(2)フラックス網が知られた条件で、各地先でのフラックス変化および生態系サービスを評価することが必要である。これは前章で説明したような流れ(図-7)で、類型景観ごとに手法が普遍化されているの

で、まず地先がその類型景観に属しているものかを認識しておくことが重要である。この部分をTool Box 2と呼んでいる。生態水工学的的手法を駆使した部分である。

アセスメント全体としては、この部分でのアウトプットのひとつであるフラックス変化は、流域圏全体に伝播するもので、フラックス網にフィードバックされねばならず、図に示すような繰り返し経路を有する。一方、生態系サービスは地先に蓄積されるものであるが、流域全体としての評価のための総合評価が必要でその部分をTool Box 3とした。この評価にも影響されて、各地先でのあるいは全体での施策が展開されるであろうし、その場合には、それらの施策を取り込んだアセスメントが流れる仕組みとしている。Tool Box 3については、生態系サービスによって置き換えられる化石燃料で評価する手法を検討中であるが、この時点では確立されていない。

この部分のアウトプットのひとつであるフラックス変化は、フラックス網に沿って伝播し、周辺の地先での解析にフィードバックされることになるので、Tool Box 1はこれに対応できるようにすることが肝要である。またそこでは人工的フラックスも付加しなければならない。

本章では最後に、Tool Box 1(フラックス網解析)の部分の構成を示しておこう。基本的には、自然的フラックス網の解析で、いわゆる水循環にかかわる流出解析(分布型)を実施し(水フラックス解析)、それにもとづいて流砂フラックス網を解析する。さらに水、土砂とともに移動するさまざまな物質の輸送過程を解析するが、流域のさまざまな地先での物質の発生や生元素状態変化については、本研究で開発する生態系モデルに依存するところも多く、さしあたって、従来の手法(原単位法)も援用しながら0次近似フラックス網の計算を優先させ¹⁵⁾、図-8の枠組みのTool Boxが精緻化されるとともにup dateすることとした。いずれにせよ、各地先でのフラックス変化の評価精度を向上させる、あるいは施策実施による効果を考えるごとに、その効果をフラックス網の全体計算に反映できる仕組みをTool Box 1に仕込むことが肝要である。

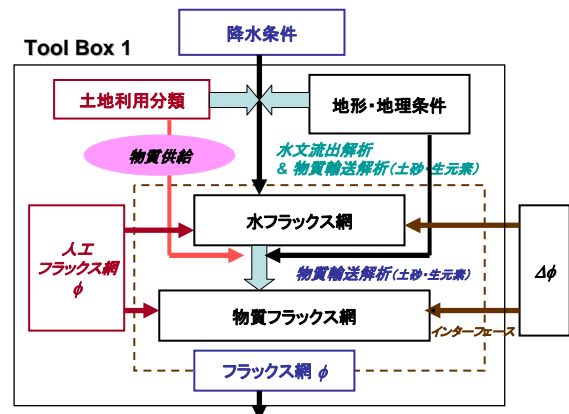


図-8 フラックス網解析の流れ

9. あとがき

わが国の主要な都市圏のように湾域に面して立地し、人工的フラックス網でも連結された複数の流域の複合体であり、また湾域水環境、水産活動を含む沿岸生態系も含めた、「流域圏」が、国土の持続的発展を考える重要な単位になっている。つまり、水循環が駆動する流域生態系のもたらす生態系サービスの享受(自然共生型シナリオ)が、人工のインフラストラクチャや人工フラックス網が必要としていた高エネルギー負荷については化石燃料消費を代替する可能性を持つ持続的国土管理の一つのシナリオと考えている。本論文では生態系サービスの享受度合によって自然共生度をはかり、それを持続的指標として環境管理を駆動させるアセスメント枠組みを構成した。そして、その枠組みに必要なツールボックスを明確にし、水工学的手法でそれらを開発しようとしたものである。生態系はむしろ空間ごとに固有なものと考えられ、そのため生態系サービスを指標とするアセスメントの手法あるいはそのツールボックスの普遍化が難しかった。本研究では「類型景観」の概念を導入して、類型景観ごとに生態系の仕組みあるいはモデル化が相似であると考えて手法の標準化を目指した。部分的には、河川域など限られた地先で適用できる手法が開発されてきたが、流域や流域圏全体への適用についてはケーススタディを含めて検討が残っている。また、今日ではこうしたアセスメント技術が、例えば自然共生型流域圏構築に向けて能動的な働き・役割をすることをとも実証することが求められている。今後こうした視点でも研究を進めていきたい。

謝辞：本研究は、2006～2010年度文部科学省振興調整費・重要課題解決型研究「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」として、その構成員である名古屋大学、国土技術政策総合研究所、土木研究所、国立環境研究所、農村工学研究所、水産工学研究所・養殖研究所に所属する研究員との共同研究で実施された。研究費支援、有意義な助言・討議に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省国土計画局：国土形成計画(全国計画)，130p., 2008 (参照：<http://www.mlit.go.jp/common/000019231.pdf>) .
- 2) 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.
- 3) 伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発プロジェクト事務局，HP 伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発，2008. <http://www.erp.jp/>
- 4) 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.

- 5) Tsujimoto, T., Toda, Y. and Obana, M.: Assessment framework of eco-compatible management of river basin complex around a bay, *Advances in Hydro-Science & Engineering*, Vol.VIII, ICHE, NHRI, Nagoya Univ., CD-ROM, 2008.
- 6) Costanza, R., R. d'Arge, R. Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. van den Belt : The value of the world's ecosystem service and natural capital. *Nature*, **387**, 253-260, 1997.
- 7) 河川生態学術研究会：HP 川の自然環境の解明に向けて，2007. <http://www.rfc.or.jp/seitai/seitai.html>
- 8) Osugi, T., Tate, S., Takemura, K., Watanabe, W., Ogura, N., and Kikkawa, J.: Ecological research for the restoration and management of rivers and reservoirs in Japan, *Landscape and Ecological Engineering*, No.3, Springer, pp.159-170, 2007.
- 9) Tsujimoto, T., Katakai, T. and Sumi, T.: Sand bar landscape and role of vegetation and subsurface flow on ecosystem service, *Proc. 32nd Cong. of IAHR*, Venice, Italy, CD-ROM, 2007.
- 10) 河川生態学術研究会木津川研究グループ：木津川河川生態総合研究，第2巻，2008(印刷中)。
- 11) 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，2008(投稿中)。
- 12) Nestler, J.M., Milhaus, R.T. and Kayser, J.B.: Instream habitat modeling techniques, *Alternative in Regulated River Management*, edited by J.A. Gore and G.E. Petts, CDC Press., 1989.
- 13) 戸田祐嗣，多田隈由紀，辻本哲郎：砂河川における付着藻類の空間分布に関する研究，水工学論文集，第51巻，pp.1213-1218, 2007.
- 14) Tashiro, T. and Tsujimoto, T.: Numerical analysis of population dynamics of net-spinning caddis larvae and substream adhesion due to their inhabitation in a cobble-bed river with fewer disturbances, *Jour. Hydroscience & Hydraul. Eng.*, JSCE, Vol.24, No.1, pp.115-131, 2006.
- 15) 佐藤圭輔，椿涼太，戸田祐嗣，辻本哲郎：矢作川流域を対象とした水・物質フラックス網の構築と生態系サービス評価モデルへの適用，河川技術論文集，Vol.14, pp.373-378, 2008.

(2008. 9. 30受付)