

自然共生型流域圏環境アセスメントの 評価枠組みの構築

辻本 哲郎¹・戸田 祐嗣²・尾花 まき子³

¹正会員 教授 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

²正会員 准教授 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: ytoda@genv.nagoya-u.ac.jp

³正会員 研究員 名古屋大学大学院工学研究科
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: mobana@civil.nagoya-u.ac.jp

国土の持続的管理において「自然共生型流域圏」のシナリオと想定し、流域意見管理の評価手法の確立が、こうした流域圏構築に向けて必須と考えた。2006年度からの科学技術振興調整費による「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究の初期のミッションであるアセスメント技術の研究から、そこで重要となるいくつかの概念の明確化と、アセスメントとしての枠組みを提示するものである。とくに国土管理の単位としての流域、流域圏の捉え方、自然共生型にかかわる「生態系サービス」の考え方やそのための生態系の理解、またアセスメントの流れの中で必要なツールボックスの提案をした。ツールボックスとしては、まず流域圏を構成する水、土砂、生元素などさまざまな物質のフラックス網解析、各地先での生態系サービスやフラックス変化などがある。

Key Words : Hydrological cycle, Ecosystem, Ecosystem service, Eco-compatible river basin management, River-basin complex

1. まえがき

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。2006年度から開始の科学技術振興調整費による「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」(<http://www.arp.jp/index.html>)では、流域圏の評価法としての環境アセスメント技術の構築がその根幹を成す。各地先が有する生態的機能の評価手法と、その流域圏全体での総合化、さらにはその総合評価が持続的な国土管理にいかに関与するかが本研究のポイントとなる。まず、流域圏を山地、丘陵地、様々な水成地形といった自然地形と農地・畑地などの土地利用の重ね合せからなる類型景観に分類し、各類型景観が有する生態的機能を発揮するしくみを捉え、そこで顕在化した効果を生態系サービスとして指標化する。各類型景観では相似な機構が働くが、各々が有する面積や流入フラックスなどの条件、さらには様々な施策に応じて評価することができる。さらに流域圏は、水系を軸とした自然のフラックス網と上下水道や食料輸送といった人工フラックス網で覆われている。

流域圏上に配置されている各々の条件でモデル化された各類型景観が自然・人工のフラックス網で連結された流域圏モデルを、伊勢湾流域圏上で構築することを考えたものである。この結果、伊勢湾流域圏は陸域から湾域に至るまで数十個の類型景観の集合体であること。また各類型景観をフラックス網で連結したことによって、各地先が生み出す生態系サービス評価のみならず、その影響が流域圏内に伝播した状況下での、流域圏全体での生態系サービス享受の変化が評価できる仕組み（自然共生型環境アセスメント手法）が概成された。さらに、流域圏の各地先で生じる生態系サービスがいかに化石燃料の消費を代替することができるかを評価する“自然共生型シナリオ”での持続性指標の構築、およびその定量化への展開が期待できる。

本論文では、上記のように展開されている研究プロジェクトから自然共生型流域圏環境アセスメントの評価枠組みの構築について述べる。すなわちそこで重要となるいくつかの概念の明確化と、アセスメントとしての枠組みを提示するものである。

2. 流域

本研究では、「流域」を国土管理の上での重要な単位と考える。それは、ひとつは流域が「水循環」の地球表面上の単位であるからである。水循環そのものはグローバルであるが、いったん地上に降った雨が河川の流量となって海にくだり、その途上で蒸発するというプロセスは、分水嶺で限定された流域で閉じるもので、しかも平均的に毎年確実に流域での水フラックスが期待される。このプロセスは流出過程と呼ばれるもので、降雨(ハイトグラフ)を河川流量(ハイドログラフ)に変換するプロセスとして定式化されている。

流域では、水だけでなく土砂も運ばれ(流砂フラックス)、これが河川地形のみならず、扇状地や沖積平野などさまざまな水成地形を提供、その場の動的性質を支えている。また、水、土砂のフラックスを介する形でさまざまな物質が運ばれていることも特徴であるが、ここでは、無機物、有機物さらには生体(biomass)と変態しながら運ばれる生元素(biophilic elements)に注目している。このとき、水、土砂フラックスとそれがもたらすそれらの時空間的変化は、生物に「生息場」(habitat)を提供することによって、また、生元素循環はエネルギーフローを介して、生物相と関連している。すなわち、生物相は、こうした流域のさまざまなフラックス網に支えられ手いる。また一方、生物相はこうした物理基盤や物質循環系に反作用を及ぼしていると考えられる。こうした、物理、化学、生物相の相互作用系が「生態系」(ecosystem)であるととらえる。このように考えれば、「流域」は「生態系」を考えると空間単位であることがわかる。

3. 生態系

上記で述べたように、「生態系」は単に生物相の動態を言うのではなく、それを支えている物理基盤、物質循環とともに相互作用系を形成している生物相を主体とするものである。これを概略的にしましたものが図-1である。生態系を構成する(A)物理基盤は、流れ、流砂、地形そして植生が相互作用を及ぼしあっている系で、河川水理学(Fluvial hydraulics)がその解明にたずさわっている。植生は生物である植物が群落をなしたものであるが、それが水流に及ぼす影響は極めて大きく、また植生は水流が流砂を伴って規定する地形に強く依存するものである。

(B)生物相は、しばしば個体(Individual)、あるいは集団(個体群、Population)、あるいはさまざまな種からなる生物群の動態として捉えられる。また(C)物質循環系は、生元素のさまざまな容態での輸送、捕捉・貯留・流失のほか、硝化・脱窒などの作用を含む。また生物相とは一次生産、同化、代謝・分解作用で強くかかわっている。とくに、物理基盤は、生息場提供というかたちで生

物相にかかわる一方、物質循環のさまざまな素過程が発現する場所の提供をしている点で重要である。すなわち、流域の中でさまざまな物理基盤あるいはその組み合わせ(景観)が生態系を規定する。こうした、相互作用系としての生態系が、流域の各地先で成立しているとする。

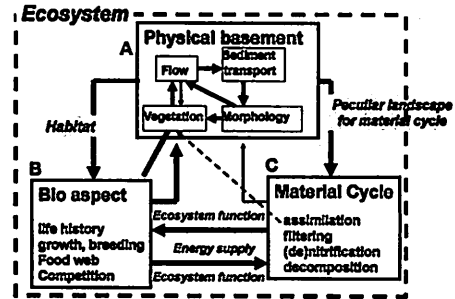


図-1 生態系

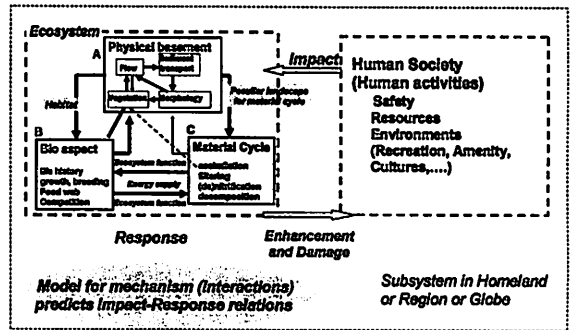


図-2 人間活動に影響される生態系

生態系は、上記の個々のサブシステムの解明(サブシステムの中の個々の素過程の解明・記述)で明らかにされるが、ここでは、こうした生態系の働きでもたらされる「生態系サービス」(ecosystem service)に着目することにした。生態系サービスにはさまざまなものがあるが、その貨幣換算が興味をもたれているところであるが、本研究では、流域の各地先で成立する生態系が、各地先でそれぞれ、固有の生態系サービスを生み出しているものとする。一般的に、生態系サービスの価値を貨幣換算しようとするものが多いが、ここではそういう方向とは異なることをここで注記しておく。

さて流域のさまざまな地先での生態系は、流域での人間活動によって大きな影響を受けている。多くの人間活動も、やはり人間社会・活動の持続性を支えるために設計されたもので、その目的には①災害軽減、②資源開発(確保)、③環境保全がある。こうした人間活動が、図-1でモデル化される生態系にインパクトとして作用し、この相互作用系が応答(レスポンス)する。近年の生態系変質(ecosystem degradation)もこうした仕組み(図-2)で理

解し、またミチゲーションやレストレーションもこの仕組みの中で理解する。このImpact-Responseの仕組みを明らかにすることが、生態系の機構解明の重要な視点である。言い方を変えれば、生態系の人間活動に対する応答を示すシステムとして生態系をモデル化することが重要である。

4. 生態系サービスと自然共生型

本研究では持続可能な社会の実現について、「自然共生型」社会をシナリオとする。すなわち、歴史的に流域のさまざまな地先で、生態系サービス享受着て成立してきた社会が、人口増を許容し経済的發展を享受するためさまざまな人工的な施設(インフラストラクチャ)を国土に景観として付け加えてきた結果、さまざまな環境劣化とともに化石燃料の浪費を招いてきたと認識した。自然共生型とは、生態系サービス享受型に流域での社会構成を変革させることで、化石燃料消費を抑え、持続性に向かおうとするものと考えた。

すなわち、本研究の枠組みでは、生態系が存続する流域の管理によって、生態系を良好にマネジメントし、できるだけ多くの生態系サービスを享受できる形に向かう施策を定量評価しようとするものといえる。

5. フラックス網としての流域と生態系サービス

まず流域はさまざまな物質(水、土砂を含む)のフラックス網の集合体と認識される。その流域のさまざまな地先でさまざまな景観があり、そこでの生態系が「生態系サービス」を生み出しているとともに、フラックスを局所的に変化させる(図-3参照)。生態系のモデル化は、「生態系サービスES」と「フラックス変化 $\Delta\phi$ 」を合理的に求めるためのものでなければならない。

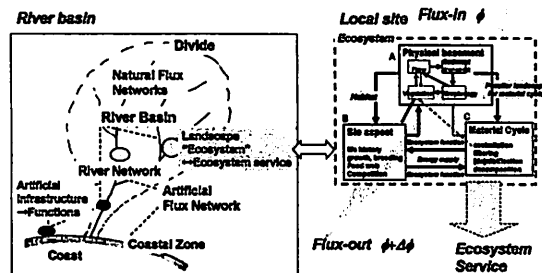


図-3 流域と生態系

今日、流域では増加した人口や人間活動を支えるために、あるいは効率的に(それまで生態系サービスとして享受していた)機能を得るため、そうした機能を人工的

に生み出す施設・インフラストラクチャを追加したり、人工的なフラックス網を追加してきた(図-3にも補足した)。フラックス網としては灌漑・排水路や上下水道のほか、直接物質を運搬する道路・鉄道網も含まれる。道路・鉄道はルート網で、これに車両による対象物質の輸送量を含めてはじめてフラックス網である。

6. 都市と流域圏

日本に限らず大都市の多くは湾(閉鎖性水域)に面している。このとき、湾にはいくつかの河川が流入し、これらは湾を通じて共同体である。また、その複数の流域圏は都市の人間活動の活発さを支えるために高密度に人工的フラックス網で連結され、また人工施設の配備も多い。さらに、湾域への流域圏環境のフラックス網を介しての影響は、湾の水環境・生態系として都市環境、都市生活にフィードバックされる。名古屋大都市圏をもつ伊勢湾で言えば、流域は名古屋を、災害軽減、資源確保の面から変質を余儀なくされ、流域の変質や都市活動の影響を受けた伊勢湾の水質悪化やそれに伴う沿岸水産への悪影響などで、この地域の人間生活を脅かしている。こうした連鎖を断ち切るためにも、この地域の自然共生型流域圏構築が構想されている。

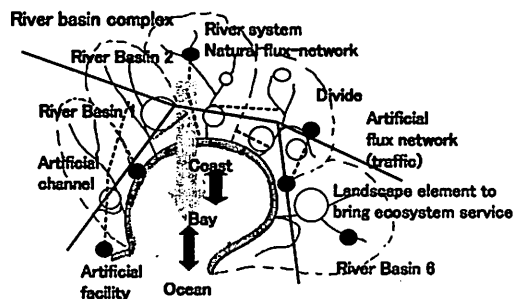


図-4 大都市と湾を抱える流域圏

7. 自然共生型流域圏アセスメント

持続的社会実現のために自然共生型流域圏を構築しようすることは概念的に理解できても、果たしてどのような施策あるいは施策群がどのように持続性を達成するかを、合理的に定量的に評価されなければならない。これまで述べてきたシナリオから、そのためのアセスメントの枠組みとして備えるべきものは次のとおりである。

まず、(1)各地先での「生態系サービス」を局所的評価するとともに、その地先の生態系が流域フラックス網に

与える影響(フラックス変化)を合理的に予測する枠組み。
 なお、(2)各地先での生態系サービスやフラックス変化を生む生態系を定量評価するには、その地先に流入するフラックスを知らなければならない。すなわちあらかじめ流域特性としてフラックス網が知られていなければならない。ただし、このフラックス網は各地先の生態系によって変化を受けているので、(3)さまざまな地先での影響は、フラックス網の再計算にフィードバックされねばならない(繰り返し解析)。

図-5は上記をフローチャート化したものである。図中のTool Box 1は、フラックス網解析のツールボックスであり、それを境界条件として各流域の地先ごとの生態系の質を知り、「生態系サービス」と「フラックス変化分」を評価するところがTool Box 2である。フラックス変化分が評価されるとTool Box 1に戻ってフラックス網は更新される。Tool Box 3は、各地先で生み出された生態系サービスの総和を流域としてどう評価するかを与えるもので、著者らは「化石燃料代替ポテンシャル」を計算するツールボックスの作成を急いでいるところである。各地先ごとのフラックス変化、生態系サービスを計算するに当たっては、次章で述べる「類型景観」の概念を導入、アセスメント枠組みの普遍化を目指している。

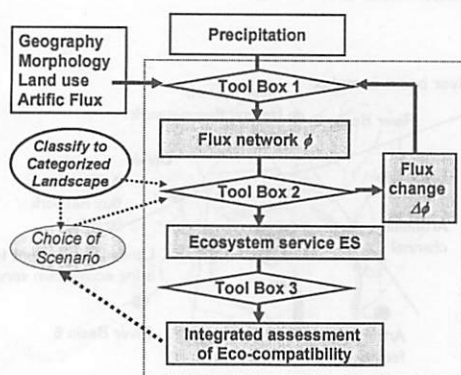


図-5 アセスメントの枠組み

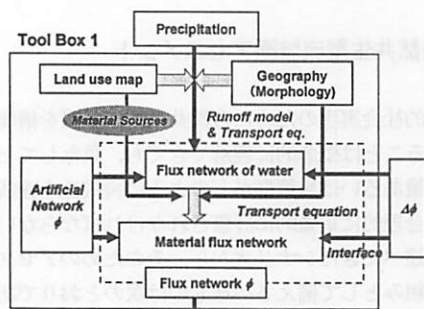


図-6 Tool Box 1 フラックス網解析

なお、ここで、Tool Box 1, すなわちフラックス網解析ツールボックスについて触れておこう(図-6)。基本的に流出解析プログラム(小流域分割流出解析)に準拠しており、まず水フラックス網を解析、続いてさまざまな物質フラックスの解析を行う。土砂について移動床過程を、生元素輸送では物質の容態変化や生物相との相互作用にかかわるサブツールボックスが必要となる。

また図-6にも示されているが、水文循環に駆動される流出解析ベースの自然のフラックス網に、人工フラックス網を追加しなければならない。水路網は河川水系に直結しているのが普通で、自然フラックス網に連結しやすいが、道路などの輸送網は輸送量ベースでしかも行政体をOD(Origin-Destination)表示されているため、自然の小流域に再配分する手間が必要である。

8. 類型景観

上記の枠組みに示すように、生態系サービスとフラックス変化は地先ごとにその固有性に依拠して(変化するフラックスの質、生態系サービスの種類も手法も)評価される。アセスメント技術としてここを一般化するため、「類型景観」の概念を導入した。すなわち、対象とすると先がある「類型景観」に属していれば、その手法は一般化されるということである。すなわち、生態系の構造が「相似な」景観を、「類型景観」と呼ぶこととした。例えば、河川生態研究から、セグメントという概念が導入される。同じセグメントの河道であれば、河道動態特性(物理基盤特性)は相似であり、同様な生息場、生元素循環の素過程の生起場が与えられるであろう。こうしたことから河道のセグメント区分を基本とした。セグメントは、扇状地河川、自然堤防帯河川というように、氾濫原など背後地特性に関連したものである。水成地形については堤内地形も同様に区分、さらに丘陵斜面、台地、山地などを加えた。一方、生態系に影響を及ぼすという視点で、人工的な区分を複合させた。人工的区分としては陸域では土地利用区分を採用、河川においてはダムの影響域を区分また海域は、沿岸域を自然海岸(河口を伴うか否かで細区分)、港湾海岸、また湾域と外洋を区分する(図-7参照)。

なお、湾域についてはさらに工夫を要した。すなわち、湾域シミュレーションを基本としており、陸域(流域圏)からのフラックスを湾域への境界条件とした。なお、外洋との境界条件に工夫を要する(未知の部分が多い)。また湾域シミュレーションの精度(解像度)上の問題から、湾域でのシミュレーションの解を沿岸域(沿岸生態系や水産)にフィードバックさせるのに若干の工夫を必要とした(たとえば、湾域の貧酸素水塊の平均位置のシミュ

レーションとそれが、沿岸生態系を襲撃する確率モデルの融合など)。

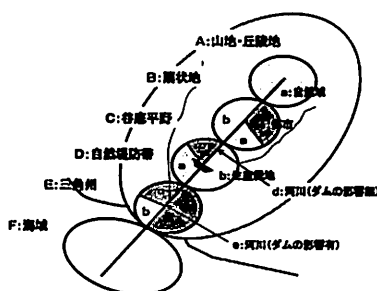


図-7 類型景観の概念図

このように、類型景観を特定すると、類型景観ごとに生態系のモデリングがなされ、注目すべき物質、生態系サービスなどのほか、その知先で展開されるであろう施策も想定しやすい。この状況が、図-5においてTool Box 2の左側のからの点線矢印で示されている。各地先で想定される施策(群)が、流域全体としての施策群、シナリオとして、アセスメントで比較するための、代替案提案にも役立つこととなる。

9. Tool Box 2について

Tool Box 2は類型景観ごとに、生態系のメカニズムに基づいて、生態系サービスやフラックス変化を評価するツールボックスである。境界条件はその地先に流入するフラックスで、それはTool Box 1であらかじめ与えられる(その後更新されることがある)。

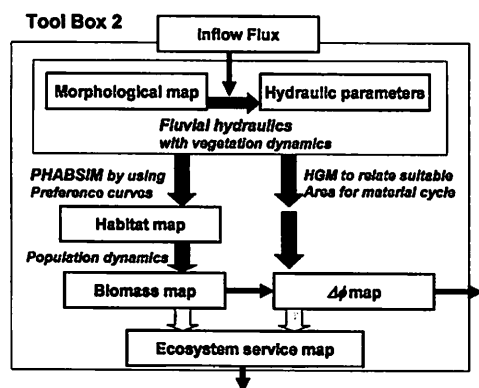


図-8 Tool Box 2 生態系解析

Tool Box 2となる生態系モデルは以下のような構成となる。まずその地先の適当なスケールの景観を対象とする(河川のセグメントで言えば、リーチスケール)。そこ

での地形図が準備される。与えられる流入フラックスに対して水量や水質指標(物質のさまざまな容態での濃度など)の時空間分布を求める手法が必要で、ほぼ水理解析として確立されている。とくに植生を伴う流路での移動床過程に関する最近の研究の進展がこの部分を支援する。次に、PHABSIM (Physical Habitat Simulation) やHEP (Habitat Evaluation Procedure) として開発された生息場解析(このとき、生物学情報として選好曲線などが提供される)によって生息適性分布図 (Habitat Map) が作成され、必要に応じてPopulation Dynamic Modelingを用いた解析で生物量(バイオマス)の時空間分布図 (Biomass map) が作成される。

一方、地形や水量分布から生元素物質循環の素過程の生起場分布図、さらには生息分布図 (Habitat mapやBiomass map) と組み合わせ、必要なあるいは代表的なフラックス変化時空間分布 (Δp map) および生態系サービスマップ (B値の時空間分布図) が描かれる。このTool Boxは空間分布というマップを次から次に書き換えていくという意味で写像 (Mapping) ツールとなっている。

10. あとがき

本論文では、自然共生型流域圏管理に必要な「自然共生度」を指標と想定したアセスメントのフレームを示した。とくに、その構築に必要な概念を提案するとともに、その定義を明確にした。主要な概念とは、流域、流域圏、フラックス網、生態系サービス、類型景観であり、それらを明らかにするとともに、それに基づいてアセスメントの枠組みとそれを支援するツールボックスの構成内容について述べた。

流域圏とは、水循環に駆動されるフラックス網に加えて人工的フラックス網の集合体であり、その各地先で生態系の作用によって、生態系サービスが生み出され、またフラックスは局所的に変化する。局所的に生み出される生態系サービスは流域圏の財産として総和されるのに対し、フラックス変化はフラックス網を通して流域圏に渡って伝播する。こうした仕組みを算定するツールボックスの構成が明らかにされた。

なお、自然的フラックス網は流出解析モデルの援用で開発される一方、人工的な物質の流通については自然科学的でない手法を要する。

今後はモデル流域について、この枠組みに基づいたアセスメントの試行を行うとともに、科学技術振興調整費の研究プロジェクトとしては、こうしたアセスメント枠組みを持つことでそのように自然共生型流域圏の実現への具体的道筋が描けるのかについても研究を進めていく予定である。

謝辞：本研究は、2006～2010年度文部科学省振興調整費「伊勢湾流域における自然共生型環境管理技術開発」研究として、その構成員である国土政策技術総合研究所、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) 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 (1997) The value of the world's ecosystem service and natural capital. *Nature* 387, 253-260.

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

- 3) Tsujimoto, T. 1999. Fluvial processes in streams with vegetation. *Jour. Hydraul Res., IAHR*, Vol.4, No.6, pp.789-803.

ASSESSMENT FRAMEWORK OF ECO-COMPATIBLE MANAGEMENT OF RIVER BASIN COMPLEX

Tetsuro TSUJIMOTO, Yuji TODA and Makiko OBANA

Toward the sustainable land and society, eco-compatible river basin management is one of interesting scenarios. Particularly in Japan, geographically and climatically hydrological cycle plays a great role and it grows Japanese landscape, which provides us various ecosystem service. In order to accept and enjoy ecosystem service again as much as possible, we have to establish an eco-compatible river basin management strategy. The construction of assessment framework of eco-compatible river basin management in this study is on this line. In this paper, the framework of assessment and required tool boxes are studied with clarifying the concepts necessary for its establishment.