

自然共生型流域圏環境管理 —流域圏フラックス網に連結された景観が 果たす役割の評価—

辻本 哲郎¹・戸田 祐嗣²・尾花 まき子³・安佛 かおり⁴

¹フェロー会員 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:tsujimoto@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
E-mail:ytoda@cc.nagoya-u.ac.jp

³正会員 研究員 名古屋大学大学院工学研究科
E-mail:mobana@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴研究員 名古屋大学大学院工学研究科
E-mail:kanbutsu@civil.nagoya-u.ac.jp

流域圏での健全な水循環の構築による持続性の確保にむけて、水循環や生態系に着目した流域圏スケールでの総合的な環境管理の重要性が指摘されている。特に流域圏管理やその中での事業の達成度を評価するための指標と流域圏環境を生態系や人間活動の影響を含めて評価する手法の開発が望まれている。2006年度からの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」では、「自然共生型流域圏」シナリオを想定し、生態系サービスを指標とした流域圏環境アセスメント技術を開発した。本論文では、流域圏環境アセスメント技術の設計手法を、その構成要素である3つのツールボックスの連結性を明確にしながらしすとともに、アセスメントを駆動力とした自然共生型流域圏の構築へ向けた道筋を論じる。

Key Words : *Eco-compatible environmental management, River-basin complex, Ecosystem service, Sustainability*

1. まえがき

持続可能な国土管理を目指すとき、その一つの管理単位として流域圏を想定し、水循環を駆動力とした自然が持つ物質循環機能を最大限に利用する「自然共生型」シナリオの下での流域圏環境管理の評価手法の確立が必須である。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)^{1,2)}のなかで、自然共生型流域圏構築を駆動する生態系サービスを指標としたアセスメント技術の開発に取り組んでおり^{3,4)}、流域圏における水・物質のフラックス網と、散在する「景観」(生態系)を通過するときに地先に生み出される生態系サービス(ES)に基づいて、流域圏環境を総合的に評価する仕組みをすでに提案した^{5,6)}。そこで提案された流域圏を評価するモデルは、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 (TB-1)、類型景観観

との生態系のメカニズムに基づくフラックス変化 (4p) と生態系サービスを算定する Tool Box 2 (TB-2) と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 (TB-3) から構成される。本論文では、これら3つのツールボックスを組み合わせた流域圏環境アセスメントの手続きを示すとともに、アセスメント技術の最重要部分である流域圏環境の指標化を担う Tool Box 3 のモデリングを行う。

2. 流域圏の捉え方-さまざまなフラックス網と景観-

流域は、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の集合体といえる^{5,6)}。また、流域内にはさまざまな「景観」が存在する^{5,6)}。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」の相互作用系である。これは「生態系」そのものであり、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。流域に点在する景観すなわち生態系は、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の流域と沿岸域・湾域を含む集合体を「流域圏」として捉えることとする (図-1 参照)。

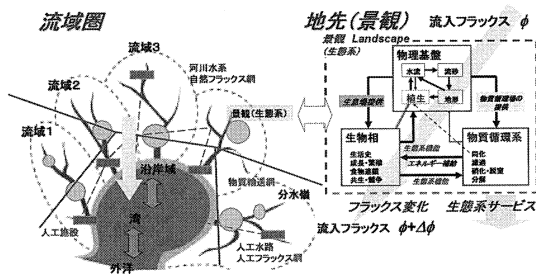


図-1 流域圏と個々の景観の役割

3. 流域圏環境アセスメント技術の構築

自然共生型の流域圏環境管理においては、化石燃料の投入によって成り立っていた経済活動を生態系サービスで代替することにより、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楽しむことができる形に向かう施策を定量評価するためにはまず、流域圏の定量的な記述が必要である。

(1) 流域圏の記述

先述したような流域圏の捉え方とフラックスが景観を通過することによって「フラックス変化 ($\Delta\phi$)」と「生態系サービス (ES)」を生み出す仕組みをもとに、流域圏が記述される様子を図-2に示す。流域圏の記述モデルは、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、類型景観ごとの生態系のメカニズムに基づくフラックス変化 ($\Delta\phi$) と生態系サービスを算定するTool Box 2と各地先に蓄積されるさまざまな生態系サービス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を中心として、その周辺にTool Box 2が地先ごとに配置され、フラックス変化 ($\Delta\phi$) をTool Box 1とやりとりする。地先の特徴的な景観ごとに用意されたTool Box 2がフラックス変化と生態系サービス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は、Tool Box 3による標準化・統合化が必要で、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。フラックス網解析については、陸域の流出解析モデル⁷⁾と湾域での湾内流動シミュレーションを基礎にTool Box 1として技術が確立された。

Tool Box 1 フラックス網解析 陸域と海域で開発、適用
Tool Box 2 生態系表現モデル「類型景観」ごとに開発、個別景観に適用
Tool Box 3 流域圏統合化モデル(標準化+総和)

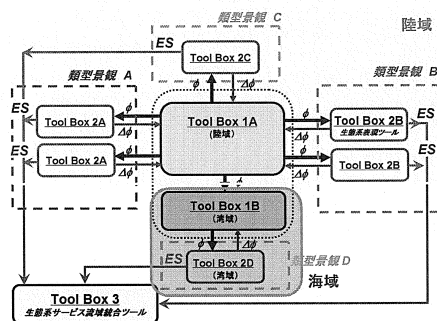


図-2 流域圏を記述する3つのTool Box

(2) Tool Box 1とTool Box 2の連結性

上記の枠組みに示すように、フラックス変化と生態系サービスは、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。アセスメント技術としてこの部分を一般化するため「類型景観」の概念を導入し、同じ類型景観に属するところでは、 $\Delta\phi$ とESを算定する手法は共通であるとした⁸⁾。すなわち、類型景観とは生態系の構造が相似な景観であるといえる。さらにTool Box 2は、各地先で自然共生施策を実効した際の施策効果を定量的に評価する仕組みを持っている。

流域圏上でTool Box 2が開発された特徴的な景観は、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、砂州や干潟をとまなう河道、浅場のアサリ稚貝着底域などが挙げられ、その各々でフラックス変化と生

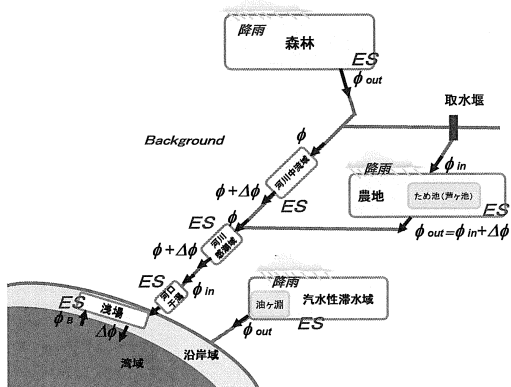


図-3 各類型景観における Tool Box 2 の連結性

態系サービスを算定する手法が確立されている。

図-3 は、流域圏での各類型景観における 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で生態系サービスが蓄積され、フラックスの変化が生じ、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。各地先で算定された $\Delta\phi$ は、Tool Box 1 へフィードバックされることによってその解析精度を向上させるほか、施策実施による効果やフラックス網全体に反映させる仕組みを Tool Box 1 は装備している。そのようなフラックスの流程方向への変化の例を図-4 に示す。

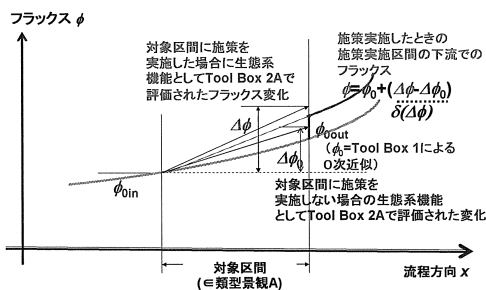


図-4 フラックスの流程方向への変化

次に、陸域と海域との連結性を図-5 に整理した。湾域では、陸域からの水・物質の流入や外洋とのやりとり、さらには干満や風の影響を受けて湾内の水が流動し、水・物質の時空間分布を変える。これが沿岸域の環境を決めており、またそこは水産場に代表されるように生態系として非常に重要な場でもあるため個別の類型景観として設定した。すなわち、湾域では Tool Box 1 としての湾内流動シミュレーションを基本としながらも、沿岸域でのフラックス変化は Tool Box 1 へフィードバックされ、また生態系サービスはその場に蓄積される仕組み

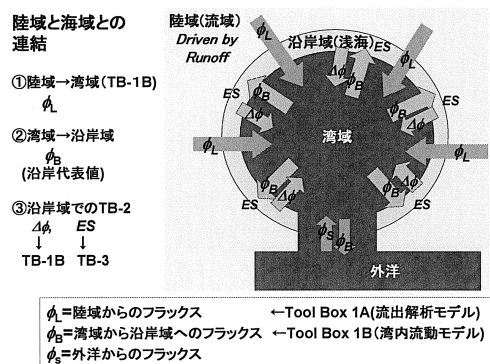


図-5 陸域と海域との連結性

となっている。

(3) Tool Box 3 のモデリング

自然共生型シナリオの下での施策評価としては、流域全体での自然共生度として統合して評価されるべきである。そのアウトプットは、流域の変貌の定量化やその修復に向けた取り組みの評価に貢献するであろう。

流域圏総合化モデルである Tool Box 3 の手法としては、(1) 各地先で算定される生態系サービスの類型化、(2) 生態系サービスを人工施設で得ようとした場合の化石燃料代替効果としての標準化、さらには (3) 自然共生指標として総合化することが想定されている。生態系サービスは、図-6 に示すように国連ミレニアム生態系評価⁸⁾によって調整、基盤、供給、文化的サービスの4つに分類されている。

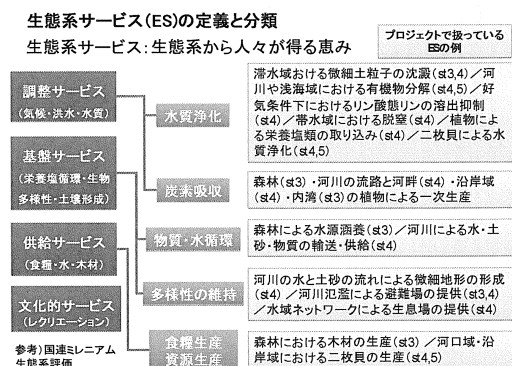


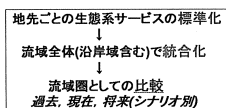
図-6 生態系サービスの類型化

この分類を参考に、本研究で対象とした類型景観で算定された生態系サービスをまとめると、a) 水質浄化、b) 食糧・資源生産、c) 炭素吸収、d) 生息場保全の4種に類型化することができた。次に、類型化した個別の生態系サ

ービスを化石燃料代替効果として標準化する必要がある。その換算の基本的な考え方は、①生態系サービス享受のための自然共生施策の実施にかかる化石燃料消費量、と②生態系サービスに代替する人工施策の実施にかかる化石燃料消費量を算定し、その差分（②－①）によって算出した値を生態系サービスの化石燃料代替効果とする仕組みである。両者の化石燃料消費量の算定に際しては、施策実施にかかる材料の運搬や施設の建設・運用、また流域圏外からの輸入にかかる化石燃料を含めて評価する。「食糧・資源生産」や「炭素吸収」に関しては、圧倒的な流域圏外とのやりとりがあるため、圏内での生産量と消費量、圏外からの輸入量や圏外への輸出量を考慮した化石燃料代替効果としての換算手法が工夫されている。その手法の確立および自然共生指標としての流域圏全体での総合化については、現在その開発を急いでいるところであり、検討がなされている。

また生態系サービスには、図-7に示したように化石燃料代替として算定が可能な範疇（狭義のES）と算定が難しい範疇が考えられる。とくに、類型化した生態系サービスのうちの「生息場保全」が後者にあてはまる。そのなかでも、例えば機能の高い生物種の生息基盤支持は、それらが持っている機能を合計することによって化石燃料代替が可能なものもある。このような明確な狭義のESを持っている生物の生息場保全を通して、化石燃料代替機能として算定することもできるだろう。つまり、類型景観としてのそれらの典型性の保持率として評価したのち、流域全体として「多様性評価」を行うこととしている。しかしながら、生態系サービス享受による化石燃料代替と多様性評価の2面をどのように総合化するかはなお課題となっている。さらに計量しがたい広義のESとしての文化的価値や経済的効率、災害に対する安全度などの総合評価、実効性などの総合化も流域での大きな課題である。

自然共生指標(持続性指標)での評価



生態系サービスの範疇

(1) 化石燃料代替の算定が可能な範疇(狭義のES)

(2) 化石燃料代替算定が難しい範疇

●狭義のESを支える

機能の高い生物種の生息基盤支持
(生息場, 食物連鎖, 競争・共生)
代替機能を持っている生物の生息場
基盤的機能

●計量しがたい広義の生態系サービス

文化・芸術(宗教), アメニティー, 趣味・リレージョン

多数の種によって
成立する生態系サービス

生物多様性

さまざまな地先で対応すべき
さまざまな種の生息条件

図-7 Tool Box 3の手法と生態系サービスの範疇

4. 自然共生型流域圏へのアプローチ

図-2に示した仕組みで、水循環にともなう流域圏の実態が記述されるとともに、流域圏環境アセスメント技術の枠組みが構築された。自然共生型の流域圏へ向けて、まず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、Tool Box 1を適用するにあたって流域は、流出解析を行うための小流域に分割され、そこでの表層地形や土地利用形態に応じて水・物質の流出量が算定できるように流出基本モデルを設計する⁷⁾。このTool Box 1によって、流域圏の現況が表現できるようにモデルのパラメータが同定される。一方、流域内の各地先で特徴的な景観が卓越的に作用している場合には、それが属する類型景観のTool Box 2を用いて、その区間でのフラックス変化を景観および生態系の作用として評価できる。またTool Box 2の適用によって各地先での生態系サービスが算定された後は、Tool Box 3が現況での流域圏の自然共生度を評価する。この現況でのフラックスの変化を図-8に示す。

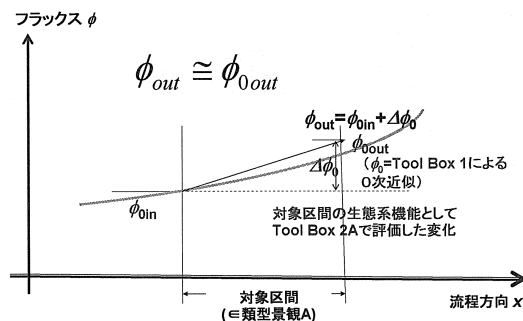


図-8 水系に沿ったフラックス変化の現況

次に、流域圏の過去からの変遷を把握する。例えば70年代からの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った。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(図-9参照)。さらに、各地先へのTool Box 2の適用によって、流域で実施された施策効

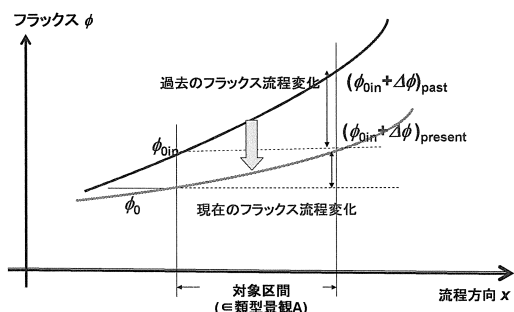


図-9 過去から今日へのフラックス変化

果としての生態系サービスを見積もることができると同時に、過去における自然共生度の評価が可能となる。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。そして、その効果を将来像に向けて評価することが戦略的な政策のアセスメントということになる。

ここでは、図-10に示すように地球温暖化や人口減少などのバックグラウンドの変化をTool Box 1で表現し、個別の施策群のメニューはTool Box 2で地先ごとに評価してTool Box 1にフラックスの地先変化を考慮するとともに、施策ごとに生み出される生態系機能を、流域圏の自然共生度としてTool Box 3によって総合評価する仕組みを考えている。

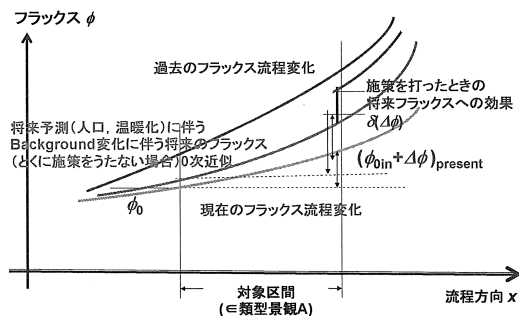


図-10 フラックスの将来変化

5. あとがき

本論文では、化石燃料消費を生態系サービス享受で代替するという自然共生型シナリオに基づいて、流域圏の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技術を構築した。アセスメントに必要な流域圏の記述モデルを構成する (1) フラックス網解析モデル、(2) 生態系表現モデル、(3) 流域

圏総合化モデルという3つのツールボックスを明確にするとともに、陸域、沿岸域と湾域で構成される流域圏で、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 Tool Box 2 を連結する仕組みを明確にした。また、流域圏総合化モデルである Tool Box 3 では、まず生態系サービスを水質浄化、食糧・資源生産、炭素吸収、生息場保全など4種に類型化した。前者3種についてはこれらを人工的な施設で行うとした場合の化石燃料使用量を代替量としてカウントすることで標準化することができ、その化石燃料代替量の換算法を明確にした。またこれによって流域圏全体としての生態系サービスの統合評価が可能となった。一方、生息場保全については化石燃料での代替が難しく、生物多様性の軸での評価が必要となる。化石燃料代替効果と生物多様性の統合評価については、今後の課題である。さらに、流域圏記述モデルを用いたアセスメントの手続きを示し、流域圏の現況・過去・将来シナリオの自然共生度を評価することによって、それらを比較するまでの手法を論じた。

今後は、モデル流域や流域圏全体へ構築したアセスメント技術を適用するとともに、自然共生型流域圏の構築に向けて本アセスメント技術の社会的実効性を高めていく予定である。

謝辞：本研究は、2006～2010年度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」研究として、その構成員である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。有意義な助言・討議に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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.errp.jp/
- 3) 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。
- 4) Tsujimoto, T., Toda, Y. and Obana, M.: Assessment framework of eco-compatible management of river basin complex around a bay, *Advances in Hydro-Science & Engineering*, Vol. VIII, ICH, NHRI, Nagoya Univ., CD-ROM, 2008。
- 5) 辻本哲郎，戸田祐嗣，尾花まき子：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，第36回環境システム研究論文発表会講演集，pp. 271-276，2008。

- 6) 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影響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.
- 7) 高岡広樹, 戸田祐嗣, 辻本哲郎: 流域圏の自然共生型アセスメントのための水・物質循環モデル, 第37回環境システム研究論文発表会講演集, 2009. (投稿中)
- 8) 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.

ECO-COMPATIBLE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF RIVER BASIN COMPLEX
- EVALUATION OF LANDSCAPE CONNECTED BY FLUX NETWORK IN
RIVER BASIN COMPLEX-

Tetsuro TSUJIMOTO, Yuji TODA, Makiko OBANA and Kaori ANBUTSU

The social concern with the sustainable land management based on ecosystem conservation has been growing in recent because rapid economic growth leads to over consumption of resources in particular fossil fuels, yielding the environmental problems such as global warming, air and water pollution and so on. In order to construct a sustainable society, the eco-compatible management of river basin complex is an attractive and efficient way to reduce the consumption of the fossil fuels. From this viewpoint, we developed an assessment technique based on the "ecosystem service" as an index of sustainability and several other important concepts needed to be defined. This paper describes the design of the assessment technique for eco-compatibility and is an exploration for constructing "eco-compatible river basin complex" by using the assessment technique.