

「流域水循環と生態系」から自然共生型流域圏構想へ

名古屋大学大学院 工学研究科 教授 辻本 哲郎

1. はじめに

流域は陸域での水循環の「単位」である。水循環そのものはグローバルではあるが、降水のほとんどは分水嶺で囲まれる流域の中でおおむね閉じている。もっとも、地下水流が流域を越える場合はあるが、流域では降水は「流出過程」を通して河川に集まり、山から海までの「流れ」をつくる。この流れは水を運ぶだけでなく、土砂やさまざまな物質を運搬している。とくに生元素と呼ばれるものは、無機物・有機物と変化するだけでなく生体としても存在しながら移動するので、陸域水循環は流砂系や物質循環系、生態系の駆動力であるともいえる。つまり陸域水循環は、地域生態系を通して人間社会と関わっている。本稿ではこうした視点から陸域での水循環と生態系、さらにはそれらと人間社会基盤について論じてみよう。とくに、筆者が研究代表者として大学やいくつかの国立研究所と共同によって2006年度から5年計画で進めている(文部科学省振興調整費)研究プロジェクト「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」での研究活動を通して考えている「水循環と陸域生態系」についてである。一方、陸域と生態系あるいは人間活動の状況に応じて陸から大気圏への蒸発散があり、大気の大循環が(海洋循環とともに)地球規模水循環を規定していることは言うまでもない。

2. 流域・水循環とさまざまなフラックス

陸域に降下する水(降水)は分水嶺で囲まれる流域内で次第に河川水系に集められるが、こうしたプロセスを「流出過程」と呼んでいる。台風や前線による強い降雨は表面流として洪水というかたちで、季節に応じた降雨が地下水などを通してゆっくり流出するものは水資源として人間生活と関わっている。こうした水の流出とともに土砂が運搬され(流砂系)、長い間にわれわれの多くの生活基盤となった沖積平野や扇状地などを形成してきたし、いまでも河道地形やそれともなう流れの様相(河相)を変化させている。さらに水や土砂の流れとともにさまざまな物質が運ばれている。とくに生元素と呼ばれる、酸素、炭素、窒素、リンなどからなる物質は、さまざまに形態を変化させながら運ばれており(無機体、有機体というだけでなく生体として)、しばしば「物質循環」と呼ばれる系を担っている。この意味で、流域は水

循環に駆動されるさまざまなフラックスのネットワークの集合体と言える。一方、こうした流域内にはさまざまな「景観」が存在する。「景観」とは地形や水の流れ、植生などの組み合わせなどによって特徴づけられる「物理基盤」である。そして、そこをさまざまなフラックスが通過するとき、そこを住み処とする生物が繁殖して特徴的な「生物相」を呈し、またさまざまな物質はそこを通過することでさまざまな変化を呈する「物質循環」を構築している。こうした組み合わせはまさに「生態系」と呼ばれるものである。図1は流域がさまざまな物質のフラックス網の集合体である。こうしたフラックス ϕ が流域内のさまざまな景観=生態系を通過するとき、フラックス網が変化させられる(変化分を $\Delta\phi$ と書く)ときに、そのこと自体から人間活動において(必要とするさまざまな機能について)さまざまな自然の恩恵を受けてきた。これをしばしば「生態系サービス」と呼んでいる。農作物生産も、自然による浄化機能はまさに生態系サービスであり、その他にもさまざまな生態系サービスが、さまざまなフラックスがさまざまな景観を通過するときに生み出される。こうしたサービスが流域のさまざまな地先に蓄積されるとともに、それともなうフラックス変化は流域のさまざまな場所にフラックス網を通じて伝播させられる。地域サービスを向上させるためフラックスの下流に負荷の増加をもたらすシナリオはそのひとつの例だ。

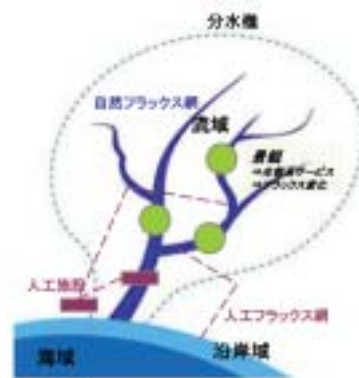


図1 流域とフラックス網

各地先の景観は一つの生態系で、図2に示すように先に述べたように、物理基盤、生物相、物質循環の相互作用系とあってよい。物理基盤がとくに河川水系で理解しやすいように、水流、流砂、地形そして植生の相互作用系であるように、生物相、物質循環

もそれぞれ相互作用系であり、かつ、この3者は互いに相互作用を及ぼしあっている。その中のわかりやすい例は、物理基盤に生み出されるさまざまな景観要素がさまざまな種のさまざまな生活史のステージにおける生物生息場を供給しているし、また物質循環のさまざまな素過程(物質の捕捉・貯留・流失、硝化・脱窒など)の生起場を提供している。また生物相と物質循環は、同化、代謝、分解などを通して相互に作用を及ぼしあっている。図2はまさに生態系の構造を著しているとともにその機能も示唆している。この機能が、フラックスの変化や生態系サービスとして評価されるべきものである。



図2 景観＝生態系の構造と機能

3. 人間活動の発展と流域の変貌

もともと上記のように水循環に駆動される生態系の仕組みを利用していた人間活動は、都市域そしてそれを支える生産緑地の拡大によって、流域の自然にかなりの負担を強い、いわゆる自然・生態系の劣化が顕在化してきた。また、その「環境容量」を超えるため(人口増、高効率化、利便性向上などによって)、いくつかの人工的なフラックス網の追加や生態系サービスに依存しない機能の確保のための人工施設設置を行ってきた。すなわち今日の流域ではフラックス網は自然の水循環に駆動されるもののほか、人工的なフラックス網が張り巡らされ、また自然景観＝生態系に加えてあるいはその代替として人工施設が散在する。

自然のフラックス網は降水-流出過程に駆動されていたため流域内に限定されていたが、人工フラックス網によって、それらが連結された。また、とくに大都市圏は湾をとりまくように発展する例が多い(日本の三大湾)。人工フラックス網の発展はさまざまな物質の輸送を開放系にしたが、それでも、大都市圏を構成する湾をとりまく複数の流域の複合体＝流域圏は強く連結されていることは間違いない(図

3参照)。また、人工系にも影響されながらもフラックス網は強く連結され、かつ水を含む多くの物質を湾に吐き出しており、湾域の水環境・生態系はしばしば大都市圏の環境の鏡と指摘されている。それは、大都市圏、流域圏と運命共同体といってよい。

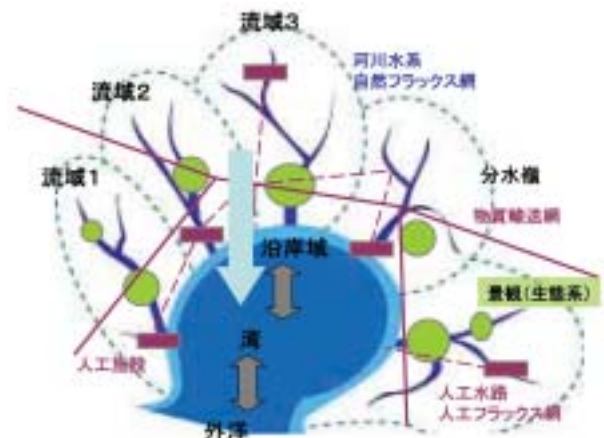


図3 湾を取り囲む流域圏

さて、人工施設稼働のみならずさまざまな人間活動を支える物資を他流域から移入させる輸送網は、高エネルギー消費により、化石燃料枯渇という視点でじわじわと持続性を脅かす状況となっている。一方、既述の自然生態系の劣化は、生物多様性という視点で、持続性を危うくすると言うリスクを拡大させている。こうした2種の持続性の視点、化石燃料代替としての生態系サービス享受拡大、生物多様性保全の両面から、「自然共生型流域圏構築」のシナリオが想定される。

4. 流域圏の記述

新しい国土計画(国土形成計画)では、持続的な国土管理はひとつの大きな柱になっている。わが国はモンスーンアジアに位置し、地形のメリハリのある国土の特徴を有するため、降水-流出を基本にした陸域水循環が流砂系、物質循環そして生態系を駆動していて、生態系サービスポテンシャルはきわめて高い。先に述べたように持続性を確保する2つの視点、化石燃料消費削減のための生態系サービス享受、生物多様性保全から、自然共生型流域圏のシナリオは大きな鍵となりうる。そのためにはまず、流域圏の定量的記述が課題である。

先に述べたように流域はフラックス網の集合体であるが、これを記述するには図4のような枠組みが必要でその表現モデルをTool Box 1と呼ぼう。

さて、フラックス網が流域内の各地先に存在する景観＝生態系を通過するときには、先に述べたようにフラックスφが変化(変化分Δφ)させられるとともに生態系サービスが生み出される。生物多様性の要

素が想定されれば、これもひとつの生態系サービスという言い方も可能である(国連ミレニアムアセスメントでは生物多様性もひとつの生態系サービスである)。これらを評価するモデルとして、図2に示すような生態系の構造と機能を記載できるTool Box 2が準備されることが要求される。

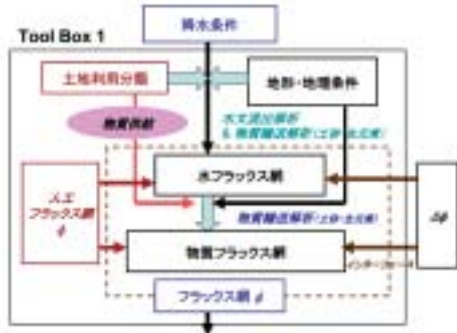


図4 フラックス網としての流域圏の記述

しばしば生態系はそれぞれ固有と考えられがちであるが、河川水系において河川の構造がセグメントごとに特徴を有していたり、生物相が河川連続体仮説によって特徴づけられたり、生息場や物質循環の素過程の生起場が物理基盤に強く規定されることなどにかんがみれば、Tool Box 2は「類型景観」ごとに標準化されるものと考えられる。最近の河川生態学の進展からすると、Tool Box 2の雛形として図5が描ける。物理基盤の特徴から生息場、物質循環素過程の場を特定し、生物の生体量と類型景観の固有な生態系サービスを結びつけるようなモデリングである。Tool Box 2は、その景観に流入するフラックスに応じてその地先でのフラックス変化 $\Delta\phi$ と生態系サービスESを定量化することが求められる。とくに後者の評価は工夫がいる。各地先の $\Delta\phi$ はTool Box 1にフィードバックされて流域圏全体に伝播する一方ESは地先に蓄積される。

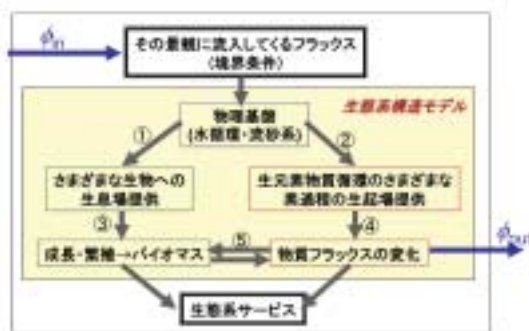


図5 類型景観ごとの生態系の記述

自然共生型施策シナリオの評価としては流域全体で統合して評価されるべきである。このES統合モデル(Tool Box 3)の開発が望まれる。この統合モデルに

ついては、水循環を軸に考えた流域管理の問題として後述することとする。

上述の3つのTool Boxによって流域圏が記述される様子を図6に示す。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が中心にあり(陸域のそれが流出解析モデルを基礎としているの)に対し、湾域のそれは複数河川水系から放出されるフラックスを境界条件とする湾内流動シミュレーション)、その周辺にTool Box 2が、地先ごとに配置され、 $\Delta\phi$ でTool Box 1とやりとりする。地先の特徴に応じて類型景観ごとに用意されたTool Box 2が適用されることになる。また、各地先での生態系サービスはTool Box 3で標準化・統合化される。

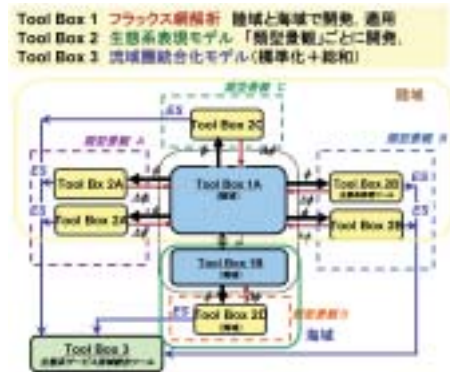


図6 流域圏を記述する3つのTool Box

5. 自然共生型流域圏へのアプローチ

図6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。流域圏は、すでに記述したように環境容量を超える努力やより効率的・快適な人間活動を支えるようにさまざまな人工的施設、フラックス網を流域に追加することで大きく変質し、環境負荷の増大による生態系の劣化・生物多様性の喪失、化石燃料の浪費など、持続性に関わる課題に直面している。このような流域圏の課題に対し、これまでに示したような水循環をベースにした流域圏の把握が、新しい方向性模索にどのように役立つだろうか。とくに、Tool Box 3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だろう。

Tool Box 3として、各地先にもたらされる水質浄化、食料(など資源)生産、炭素吸収などにまとめられるさまざまな生態系サービスは、そ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して統合される。また、生物多様性については、類型景観としての典型性の保持率として評価したのち、流域全体として(多様性指数などの評価原理にもとづいた)「多様性評価」を行うことを考えている。ただ、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

う総合化するかはなお課題となっている。さらに、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。

持続性を目指すにあたっての流域圏での2つの課題である、化石燃料の生態系サービス享受による代替、生物多様性の確保は、自然共生型流域圏構築のシナリオと基本的に合致しよう。その意味で、ここでは図6に示す流域圏把握に基づいた自然共生度把握へ道筋を考えてみよう。

まず、Tool Box 1を適用するに当たって流域は小流域分割され、そこでの表層地形、土地利用形態に応じて水や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。現況(流域内でのさまざまなモニタリングデータ)が表現できるようにモデルのパラメータが同定される。そのアウトプットはたとえば主水系の流程に沿ったフラックス変化として図7のように描ける。一方、流域内の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・生態系の作用(機能)として評価できる。これを図7に併示している。Tool Box 2の適用でその地先で生態系機能(生態系サービスと多様性への貢献)なども評価され、流域全体での現況の生態系機能を把握することも出来る。

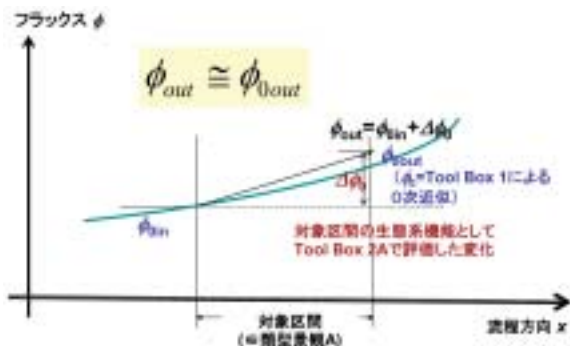


図7 水系に沿ったフラックスの変化の現況

さて次に、過去からの流域の変貌(70年代からの30年間程度)について考えてみよう。この間にはさまざまな流域施策がとられたであろうし、一方より一般的な政策や社会変化もあった。これらの結果を集約してたとえば人口分布や土地利用変化、産業形態変化にともなう負荷原単位変化などと想定することが可能であり、これらをTool Box 1への入力データの変化として想定、過去のフラックス網の変遷として推定することが可能である(図8)。このうちで、流域での施策についてはTool Box 2の適用が可能で、それによってフラックス変化への個別施策の役割とその施策による生態系機能の変化も見積もることが

出来るよう。

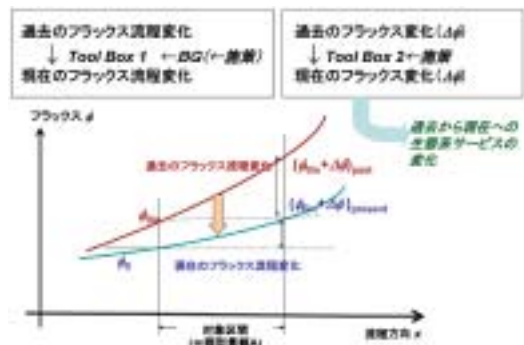


図8 過去から今日へのフラックス変化

重要なのは、今日、流域の変貌を認識し、自然共生型流域圏を目指してさまざまな施策を組み合わせたシナリオを実行することである。そして、その効果を将来像に向けて評価することが、戦略的な意味での政策のアセスメントということになる。ここでは、地球温暖化や人口減少など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 $\Delta\phi$ 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Tool Box 3で流域で総合評価する仕組みを考えている(図9参照)。

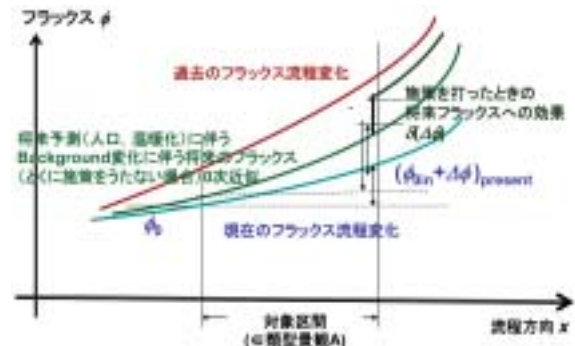


図9 フラックスの将来変化

6. あとがき

本稿では陸域水循環に着目した流域圏管理、とくに自然共生型シナリオを評価する仕組みを紹介した。さらに、地球規模の水循環とのかかわりにも触れた取り扱いが、今後の興味でありかつ国土管理の課題といえよう。

参考文献：

伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発：
<http://www.errp.jp/index.html>
 辻本・戸田・尾花「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、2009(掲載予定)。