

湾を内包する流域圏の自然共生型アセスメント 手法の構成に関する研究

辻本 哲郎¹・戸田 祐嗣²・高岡 広樹³・尾花まき子⁴

¹フェロー会員 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)
E-mail:ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

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

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

⁴正会員 名古屋大学大学院工学研究科研究員 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail:mobana@civil.nagoya-u.ac.jp

本研究では伊勢湾流域圏を想定しながら、自然共生型流域圏構想を駆動するためのアセスメント手法を確立することを目的とした。流域圏では個性のある景観が散在しそれらがフラックス網で連結され影響を及ぼしあっており、さらに湾域を共有する場合はそこに存在する人間活動の核としての都市圏と運命共同体となっている。こうした状況で、フラックス網を記述するTool Box 1、生態系としての構造と機能を有するTool Box 2、そして持続性指標に変換される生態系サービスの定量化と統合化の役割をするTool Box 3 からなる枠組を提案しているが、本論文ではとくに様々な景観で想定される施策を流域圏としての施策群としたシナリオをいくつか想定して比較することを目的に、Tool Box 1やTool Box 3との連結を考えた。またその実施が迅速に行えるTool Box 1のツールの開発とその性能検証を行った。

Key Words : *eco-compatible management, river basin complex, assessment, ecosystem service, flux network*

1. まえがき

「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)の重点分野・環境の「自然共生型流域圏・都市再生」イニシアティブ¹⁾として研究が遂行され、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。そこでは、水・物質循環のモデル化を基盤に、自然共生、先端技術開発、循環型社会構築などのシナリオが比較された。自然共生型流域圏のシナリオの中では、生息場評価などの知見も蓄積されることとなった。また自然共生型流域圏構築を実現する方向性では、同じ時期に組織された湾再生推進会議と連携した。湾の環境改善が湾に面した都市圏にとって焦眉の課題であることから、その実現に向けて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。つまり水質の総量規制などの施策と共同歩調が取られた。こうして一連のイニシアティブ研究は概形を整えたといつてよい。第3期総合科学技術基本計画(2006~2010)では、「地球規模水循環変動研究」に統合、「水・物質循環と流域圏研究領域」に改組され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つてよい。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、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。こうした中で、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」が募集され、われわれの研究チームから応募した「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」が採択された(2006~2010年度)。伊勢湾再生推進会議では、やはり当初の目標は水質基準達成とされ自然共生型流域圏はそのひとつの達成手段と想定された。その効果の評価ということであれば、まさに第2期の成果の伊勢湾への適用ということになるが、伊勢湾流域圏研究では、湾域と流域圏の総合体としての持続性を目標とするという観点から、自然共生度の軸でのアセスメント技術が整備されること、そしてそれが自然共生型流域圏の構築を駆動するという考え方で、第2期イニシアティブとは異なる総合的かつ実効的な研究を進めてきた。その基本枠組についてはこれまでも発表してきているが²⁾、本論文ではこうした骨格を具体的にモデル化するため、持続性指標として

の生態系サービスの評価の方向性を明確化し、施策群の比較のために開発された水と物質のフラックス網の迅速な計算ツールを開発した。

本研究では、自然の水・物質フラックス網としての流域が、人工的に付加された水・物質フラックス網によって複数個に連結されたもの、それに湾域を加えて「流域圏」としてその定義を明確化した（図-1 参照）。湾内水質の改善に注目が集まった従来型イニシャティヴ研究と異なり、本研究では陸域・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、流域圏全体での自然共生度の向上をめざす。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。

また、自然共生型を柱にした種々の政策メニューを組み合わせたシナリオを「自然共生達成度」の視点から比較評価することが重要であると考えている。そのためには、①地先の具体的な生態系の役割が評価でき、②各地先で実施された施策群の効果が流域圏全体を通してみることができ、そして③「自然と人間との関係性」としての流域圏全体での自然共生度の評価ができることが必要となる。そこで、各々の評価を担う3つの Tool Box を用意することによって、アセスメントの枠組みが構成できるものとした（図-2 参照）。水・物質フラックス網解析を担う Tool Box 1 (TB1) は施策群の流域圏全体での効果を評価するのに必須である、また、地先景観の持つ生態系の構造と機能をモデル化する Tool Box 2 (TB2) は生態系の役割を明確化する。そして Tool Box 3 (TB3) は、自然共生度を測る指標としての生態系サービスのモデル化としての流域総合的評価を可能にするものと想定した。

流域は、顕著な特徴をもつ「かたまり」としての「景観」が散在したものであり（その特徴を顕在的に表現する TB2）、それらが水・物質フラックス網で連結されていることが最大の特徴である。このように、流域はさまざまな特性が分布した空間であり、その分布が流域の質を決めるということに着目すると、さまざまな特性が無秩序に空間分布しているような状況では、第2期のイニシャティヴ研究での主流であったメッシュ分割に基づいた分布型流出モデルの系譜の TB1 では流域圏を記述しきれない。

2. 類型景観

流域には、さまざまな自然地形と土地利用による個々の特徴をもつ空間的な「かたまり」としての景観が散在している。それぞれの景観は、その物理基盤に

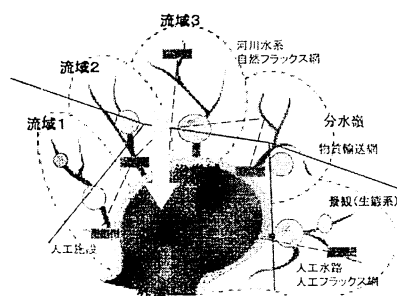


図-1 複数の流域が連結され湾に面した流域圏

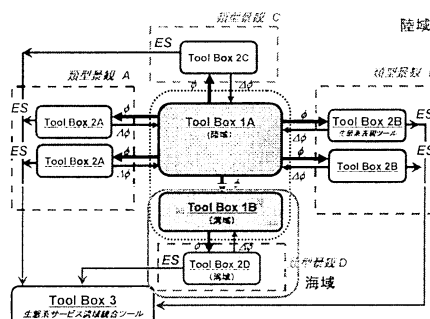


図-2 流域圏を記述する3つのTool Box

応じた物質循環が作用し、それに支えられた多様な生物が生息するシステムとなっている。これらの相互作用は生態系の機能そのものであり、そのモデル化 (TB2) にあたって「類型景観」の概念を導入した。すなわち、同じ類型景観では生態系の構造と機能を生み出す仕組みが相似であるという想定である。類型区分は、自然地形区分と土地利用区分を組み合わせる想定した。そして「類型景観」ごとに、典型的な場所での個別研究を実施、それらをもとに、フラックスが景観を通過する時に生み出すフラックス変化 $\Delta\phi$ や「生態系サービス」ESを評価できるようにしておくことをそれらの課題とした。特に、アセスメントの枠組みの中では、施策を実施することで変化する $\Delta\phi$ やESを明確に示すことが重要であり、そのうち前者はTool Box 1にフィードバックされる。

さて、フラックスの時系列は1時間刻み程度で議論されるものとしている。これに応じて、TB2 から出力される $\Delta\phi$ は同様の時間刻みとなる。ただし、ES 評価としては、各景観で想定される ES の種類により日、月、季節レベルあるいは1年レベルでの評価になる。本研究プロジェクトにおいては、いくつかの例についてすでに研究が蓄積された⁵⁾。

3. 生態系サービスによる自然共生度の評価

流域圏の自然共生度を評価する指標として、生態系

サービスを取り上げた。これは、流域圏の生態系が機能することによって生み出されるものであり、個々の地先で蓄積される「恵み」と、流域全体に伝播するフラックス変化 ($\Delta\phi$) が想定できる。

地先の恵みは各地先で蓄積されるため、施策評価としては流域全体でその最大化を図ること、あるいは公平化 (バランス) を考慮することによって施策を組み合わせることになる。これらの恩恵を計量するものとしては、持続性指標の採用を考えている。つまり、生物多様性や化石燃料の枯渇、温暖化ガス排出など持続性に脅威をもたらすものをどれだけ抑制できたかで計量しようとしている。同様にその施策に要するコストも持続性指標ではかることを考えており、費用便益を貨幣価値でなく持続性指標で計量するところがポイントである。

一方、国連ミレニアム生態系評価⁹⁾によると、生態系サービスは、図-3 に示すように A) 供給、B) 調整、C) 基盤、D) 文化的サービスなどに分類・類型化されている。先述の議論をこの分類に対応させると、まず A、B については各地先での恩恵として、食糧生産 (農作物、水産資源)、地先環境としての水質浄化や CO₂ 削減があり、これらは、化石燃料代替や CO₂ 削減の視点で定量化できるものと考え作業を進めている。C における物質循環は地先での恵みというよりも、 $\Delta\phi$ として水・物質フラックス網として流域全体での基盤として TBI に取り込まれているものである。

一方、C 中の生物多様性は、個別研究で地先の注目種についての生息場やその連結性の保全が議論されることが多いが、多様性としては流域圏スケールでの総合化が必要になる。ここでは以下のような方針で取り扱えることと考え、化石燃料代替の恩恵とは異なる軸での評価を想定している。まず各類型景観で注目する種や群集を想定し、その各地先での生息場適正 (WUA (Weighted Usable Area) や生息場連結性) をそのポテンシャル値 (類型景観として典型的に想定される量) で規格化すると、それは各類型景観から抽出したサンプルを対象流域圏全体から抽出したときの対象種 (群集) の出現確率 p_i に対応させることができ、従来の多様性指数 H や多様度指数 D などの指標⁷⁾ を以下の式から算定できる。

$$H = -\sum_{i=1}^S (p_i \log_2 p_i) \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^S p_i^2} \quad (2)$$

$$p_i \equiv \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

ここで、 n_i = i 種の個体数、 N =総個体数、 S =種の総数である。こうした指標を用いることで、自然共生施策での改善を試みながら、流域全体としての多様性指数や多様度指数の最大化を図ることが可能となる。

最後に、生態系サービスの類型 D では、文化・芸術・教育、レクリエーションなどが考えられるが、これらは、施策群評価の中で、各施策群の社会コストの制約の解きほぐし効果として見込めるものと考えているが、その定量化にはまだ至っていない。

生態系サービスの定義と分類

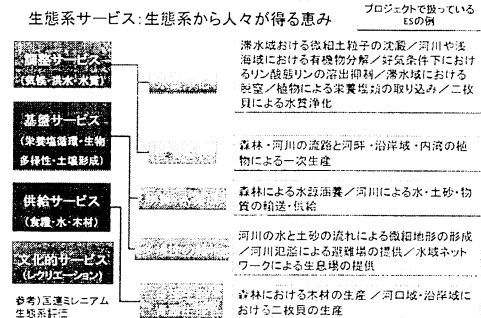


図-3 生態系サービスの類型化

4. 施策の比較評価のための水・物質循環計算ツールの作成

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性をも可能な水・物質循環計算ツール (TBI) を作成することが必要である。ここでは、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るようにし、かつ、様々な施策を様々なパターンで思考的に組み合わせて試行できる迅速性に配慮した。

(1) 作成手法

まず、GIS 解析を用いて対象流域を流路網モデルの小集水域に分割し (2km 四方程度のスケールになっている)、小集水域の地形、土地利用特性、家畜頭数や生産高などは 1km メッシュデータベースから内外挿した。小集水域はそれぞれ陸域モデルと河道モデルからなる。降雨は過去のデータ利用を勘案して観測所配置に依存した Thiessen 分割によって特定した (図-4 参照)。

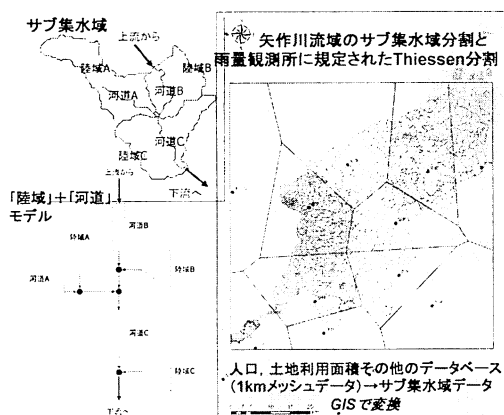


図-4 サブ集水域分割と陸域・河道モデル

本ツールによる解析対象項目は、流量、COD、TN、TP、SS である。上流小集水域の河道の出口フラックスと陸域からの流出量をあわせたものを、河道の入口フラックスとして流入させ、河道での過程をうけて、その河道の出口フラックスとする仕組みとした。陸域での降水の流出解析には、kinematic wave 法を集中化したモデルとし、物質流動には雨天時表面流出負荷量算定モデルを用いるとともに現位置貯留やそこからの降雨時最大流出の制限も考慮した。河道では、流量の解析に kinematic wave 法と等価な貯留関数法を用い、物質の挙動は 1 次元の移流方程式を用い非常項、移流項に加え浄化係数による反応項も加えた⁴⁾。

人工系としては、まず点源としてダム・取水堰、下水処理場を対象に、操作規則をモデル化して、流路網モデルの結節点で流入入させた。灌漑取水については取水量を再度受益地に雨量として分布配分している。また面源については原単位的な考え方によった。すなわち小集水域内の人口、家畜数から、それらに見合った生活排水や畜産系の排出負荷を河道へ流入させる。

一方、散在する特徴的景観での生態系機能によるフラックス変化 ($\Delta\phi$) については、TB2 モデルを河道モデルの結節点で連結させ、フラックス網から TB2 への流入フラックスが与えられ、TB2 のアウトプットを TB1 にフィードバックできるように仕組んだ。人工施設についても、今のところ簡易的なモデルを TB1 に内蔵させているが、施設モデルを TB2 と同じように詳細化して TB1 とやりとりすることも可能である。

流域圏での施策効果の比較にあたり、施策実施の有無を上述の人工系やフラックス変化とのやりとりをしながら、水・物質フラックス網を容易かつ迅速に計算できるツールが必要であることはすでに述べた。本研究では現段階においては、上記のモデルの質で十分精度的に可能でかつあらゆる側面の個別研究者側からの

アクセスの可能性の容易さも勘案して計算ツールを Excel (Microsoft Office) によって作成した。

(2) 水・物質循環ツールの実行

計算を実行するにあたり、2 種類のデータファイル A (条件入力ファイル)、B (パラメータファイル) を準備した。ファイル A には、各流域の小集水域分割と陸域・河道域を含めたそれらの接続状況、および小集水域ごとに面積、人口、土地利用、工業出荷額、家畜頭数、時系列の雨量などのデータを内蔵している。また、ここには前述した陸域・河道域での水・物質循環の計算式も含んでいる。ファイル B には、計算モデルに必要な各地目 (地形、土地利用、家畜種数、下水処理形態別など) のパラメータを格納した。各ファイルの作成には Excel を使用し、計算はマクロで実行する。これらを用いて算出された水、COD、TN、TP、SS のフラックス計算値を、陸域の出口、河道域の入口、出口別に分けて、ファイル C、D 内に格納している。TB2 を適用する場合には、その景観への流入フラックス時系列をそれらのファイルから引き出して適用し、そのアウトプットを出口のフラックス時系列に考慮できる (置き換えあるいは加減算)。このように、簡単にフィードバックが可能な仕組みとなっている。

(3) 施策の適用

さまざまな自然共生型施策を組み合わせたシナリオの比較評価に向けて、流域圏スケールでの施策の適用を簡便に行う必要がある。そこで、まず想定される自然共生施策のカテゴリ化を行った。これらを、水・フラックス網計算ツールを軸とするモデルとの関連で整理すると、カテゴリ(A)、(B)、(C)という 3 種類に大別できる。(A)は、人口分布の変化や土地利用の変化、また人工ネットワークや施設の追加などが挙げられる。これらは、ファイル A を用いて必要箇所を変更した後、TB1 を実行する。その後、補正されたフラックス網結果のもとで必要な参照地先の ES を、TB2 を用いてそこでの入力フラックスに対応させて評価する。カテゴリ(B)は、流出係数や流水抵抗、負荷蓄積状況などの地目特性の改善といった施策に対応する。これには、地目パラメータを格納したファイル B において必要パラメータを変更した後、TB1 を実行する。次にカテゴリ(A)と同様に、必要な参照地先の TB2 によって ES を評価する。カテゴリ(C)は、特徴ある景観に着目した自然共生施策の実行に対応したものである。この場合には各 TB2 によって算出されたフラックス計算値をファイル C、D 上で変更したうえで TB1 で再計算する。後は上記と同じ手順で ES を評価する。

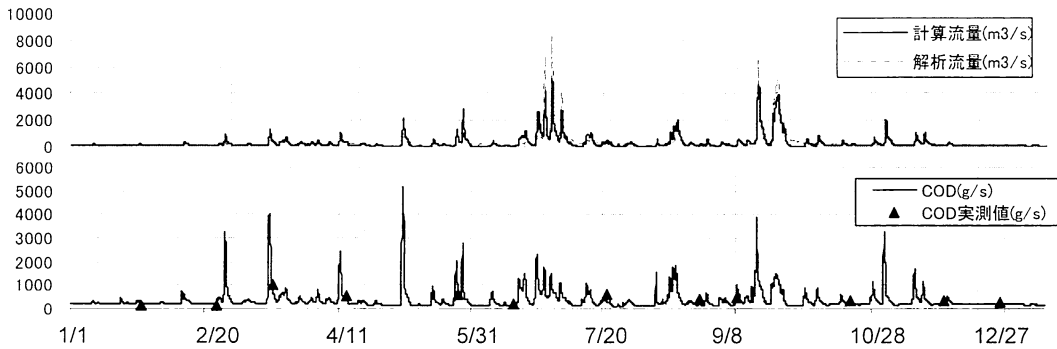


図-5 木曽川における水・物質フラックス時系列

(4) 計算例

作成した水・物質循環ツールを、伊勢湾流域圏内の10の一級河川に適用した計算結果を例示する。図-5に、気象標準年として設定した1999年の木曽川における水・物質フラックス時系列の解析結果と実測値を示す。前述したように、COD、T-N、T-P、SSフラックスを各々算出したが、ここでは特にCODフラックスを取り上げる。解析結果と実測値を概観すると、流量の増加に伴ってCODフラックスも増加していることが見てとれる。また、CODの平水時でのみ得られた実測値と解析値はほぼ一致しているといえる。さらに、伊勢湾流域圏各河川流域での年間総流出量を計算(図-6参照)すると同時に、それらの年総流出負荷の計算例も図-7に示す。

図-6の解析結果と実測値を比較すると、10河川での推定誤差は平均的に20%以下の値を示し、作成した水・物質循環ツールは広大な流域圏でのフラックスネットワークを適度に表現できているといえる。これをもとに、流域圏での負荷分布とその流出特性の地域性、人工系の影響の大きさが考察でき、アセスメントにおける本ツールの利便性が検証された。

(5) シナリオ評価の準備

ここで準備した計算ツールが機能すると判断されたので、矢作川流域に適用して過去(1980年)・現況(1999年)・将来(2030年)へと計算を行い、シナリオ評価する準備を行った。なお、気象条件などは基準年に固定した。各シナリオにおける人口や下水道整備、土地利用割合等の流域条件⁸⁾を表-1に示すように決定し、ファイルAとBを必要に応じて変更することによって過去の負荷量や形態の違いおよび30年後の排出負荷量・形態の状況について計算した。施策カテゴリー(A)・(B)による過去からの変遷と将来予測を現した結果を図-8に示す。このように、施策カテゴリー(A)・(B)においては、従来型と同様に本ツールの機能性が確認さ

れたが、カテゴリー(C)での機能性は今後の検討課題である。

以上のことから、本研究で準備されたツールの組み合わせで、人口等の条件を過去から将来推計に従い変更するなかで、過去から現在、そして今後検討されるべき様々なシナリオによる流域圏での負荷分布や地域特性などを把握することが可能といえる。

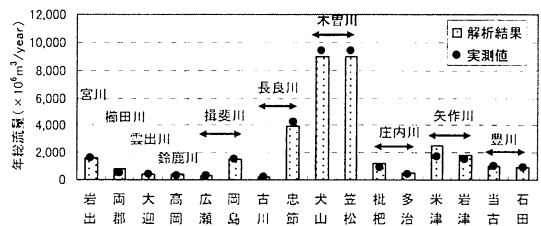


図-6 伊勢湾流域圏各河川流域での年総流出量(1999年)

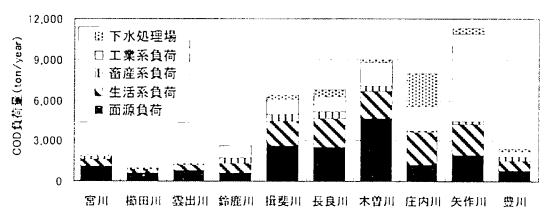


図-7 伊勢湾流域圏各河川の年総流出負荷の計算例

表-1 矢作川流域におけるシナリオ別条件設定⁸⁾

	過去(1980年)	現況(1999年)	将来(2030年)
人口	501,907人	612,823人	644,577人
下水道整備	下水道普及率 79%	下水道普及率 37%	下水道普及率 95%
土地利用割合	山林等 80%	山林等 79%	山林等 82%
	市街地 4%	市街地 6%	市街地 7%
	水田 1%	水田 9%	水田 7%
	水面 2%	水面 2%	水面 3%
	(河川、池等) 畑地 3%	(河川、池等) 畑地 5%	(河川、池等) 畑地 2%
畜産頭羽数	牛 9815頭	牛 11386頭	牛 11388頭
	豚 16150頭	豚 18767頭	豚 18767頭
	鶏 1354716羽	鶏 986977羽	鶏 986977羽
工業出荷額	2兆2890億円	6兆6328億円	4兆7343億円

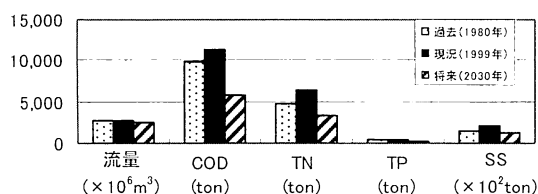


図-8 TBIによる過去からの変遷と将来予測の例

5. あとがき

本研究では、自然共生型流域圏構築・都市再生のイニシアティブ研究の成果を受けながらも、陸域からの負荷削減によって湾域を再生するといった構図でなく、流域圏が享受できる生態系サービスと湾域のそれを総合的に最大化しようという仕掛けの駆動力となるアセスメントを意識している。また、個別の景観要素の再生でなくそれがフラックス網で連結されていることをしっかり把握しながら湾域を含む流域圏の生態系サービス向上を、持続性指標とも関連させながら評価することに力点を置いた。

とくに本論文では、生態系サービスの具体的評価への道筋を示すとともに、流域圏の現状や、過去やいくつかの施策群を実施するシナリオのもとでの将来の姿が、迅速に比較できるフラックス網解析ツールの開発とそれがどのように威力を見せるかを示すことが出来た。恵みとしての生態系サービスを化石燃料代替や温室ガス排出抑制に置き換える方向性のほか、対象地先での潜在的生態適性の回復が流域スケールでの生物多様性の向上につながる道筋も示した。さらに、流域圏はフラックス網によって散在した個性ある景観の固まりがつながれているというところへの着目から、地先での施策が流域での効果に貢献できることが具体的に見えるので、そういうカテゴリーの施策へのエンカレッジにもなっていることも指摘しておきたい。

DEVELOPMENT OF ASSESSMENT FRAMEWORK FOR ECO-COMPATIBLE MANAGEMENT OF RIVER BASIN COMPLEX AROUND A BAY

Tetsuro TSUJIMOTO, Yuji TODA, Hiroki TAKAOKA and Makiko OBANA

The social concern with the sustainable land management based on ecosystem has been growing in recently. The target of the research is to develop an assessment framework to evaluate eco-compatibility as sustainability index of river basin complex which must become driving force of policies and citizen movement toward sustainable development. In this study, multiple river basins surrounding a bay is connected with one another and with the bay by flux network of water and materials. In this sense, a river basins complex is an assembly of the flux network of water and materials. As a current result, the assessment framework was developed, which consists of three toolboxes: (1) a flux network model, (2) an ecosystem model, and (3) an evaluation model. In this paper, we demonstrate how to change the flux network depending on the several scenarios by applying the developed model to the Yahagi river basin in Japan.

謝辞：本研究は、2006～2010年度文部科学省科学技術振興調整費・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・討議に謝意を表する。

参考文献

- 1) 自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシアティブ報告書、総合科学技術会議、2005。
- 2) 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。
- 3) 辻本哲郎、戸田祐嗣、尾花まき子、安佛かおり：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—、第37回環境システム研究論文発表会講演集、pp.21-26、2009。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 森主一：動物の生態、京都大学学術出版会、pp.582、1997。
- 8) 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。