

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

Design of Hydrological behavior / sediment flux model on Yahagi River Basin
and its Application to an ecosystem service estimation model

佐藤圭輔¹・椿涼太¹・戸田祐嗣²・辻本哲郎³
Keisuke SATO, Ryota TSUBAKI, Yuji TODA, Tetsuro TSUJIMOTO

1正会員 博(工) 名古屋大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 研究員
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学部9号館209号)

2正会員 博(工) 名古屋大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授

3フェロー会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 教授

Estimation of ecosystem services is an extremely effective method for the sustainable watershed management. It should be understood that ecosystem services have to be analyzed by using physical environment, which have been influenced by hydrological behavior and material load such as sediment flux. Main purpose of this research was set to design of hydrological behavior and sediment flux model on Yahagi river basin, and to suggest the estimation method for ecosystem services. As a result, it was found that hydrological behavior and sediment flux model is a powerful tool for estimating spatial-temporal water quantity/quality. In future study, based on this methodology, effects of various policies implementation would be evaluated.

Key Words : *Yahagi river basin, hydrological simulation model (BASINS-HSPF),
sediment flux network, ecosystem service*

1. はじめに

昨今、我々人類が掲げている唯一無二の環境目標「持続可能性」の評価に向けて、工学研究は極めて重要な役割を担っており、より根拠のある政策判断材料を提示して人類を導いていくことが一刻の猶予もなく要求されている。我が国の河川管理においても持続可能性を意識した改正河川法が施行されて10年が経過し、整備計画においても河川環境について多面的な情報を集め、定性的な評価を実施しているが、現状では河川環境の善し悪しを測るための指標や目標が明確に設定されているとはいえない。また、別の側面から見れば実際の河川やその集水域には“個性”があり、全ての流域に一元的に評価基準を設定すること自体がナンセンスである。河川流域の個性を許容し、これを生かしながら、人類がそれに順応する、いわゆる自然共生的指向が今後益々重要になると考えられ、これに向けた治水、利水および環境の最適な河川流域管理手法を提案し、再構築していく必要がある。

さて、現実的な河川管理に目を向ければ、河川水の水量管理は国土交通省が所管し、環境水の水質管理は環境省が担っている。上水道水質に関しては厚生労働省、我が国の利水量の2/3を占めている農業用水は農林水産省が管理する。また、陸域の土地に関しても管理者は

様々に分けられているし、利害関係者なども含めればさらに複雑である。個々には有用な情報が収集・分析されているが、今後はこれらを河川流域といった視点で統合管理し、各組織の要求する基準を意識しながらも、河川環境の向上に向けて取り得ることの出来る最適な政策を設計することが望まれるであろう。このためには、流域で起こっている事象（あるいは起こってきた事象）を科学的にかつ客観的に分析し、持続性向上に向けて今後どのような政策が必要になるのかを具体的に提案することが必要である。

このような背景を踏まえ、本研究プロジェクトでは、河川および集水域環境の健全性を推し測る基準として“生態系サービス”を用いた評価手法を提案している。本手法には、流域圏を統合的に捉えながらも個々の場における複雑な現象を生態系に代表させて評価ができるという点に特徴があるものの、反面、対象とする現象が多すぎることや相互関係が難解であるなどの理由で不確実性が大きい。この欠点は、今後の研究の発展で順次補完できるものとし、本稿では、生態系サービスを評価するための枠組みとそれを実現するための水・物質フラックス解析の流れをシステムティックに設計し、矢作川流域で試行することを主要な目的とした。この結果をもとに、現状の課題や今後の展望を整理する。

2. 生態系サービスとその評価手法

生態系サービス¹⁾とは、生態系によって生み出される機能であり、これによって我々人間は直接的あるいは間接的な恩恵を受ける。例えば食料などの資源をはじめ炭素吸収などの環境調節機能、生物多様性、あるいはレクリエーションなども広義には生態系サービスに含まれる。これらのサービスを生み出す生態系は、歴史的変遷の中で“自然現象によって形成”され、“人為的インパクト”を受けながら、そのバランスを変化させてきた。例えば、明治維新後の日本では急激な人口増加によって土地や資源の需要を生み出し、この需要を満たすためエネルギーが開発され、結果として我々の国土にその影響を与え続けてきた。言い換えれば、本来的には賄うことの出来ない人間の需要を、水資源開発や土地開発、あるいは経済発展による資本主義社会が供給してきたのである。

特に水の集水区画を基準とした“流域圏”に着目すると、生態系サービスは基本的には物理的環境（物理基盤）によって支持されており、また、その物理的環境は水をはじめとする様々な物質の流れ（フラックス）やその集積によって形成されていることが多い。一方、生態系サービスを発現している空間的位置やスケールは、場の特徴によって分類することが可能である。これを本研究では“類型景観”と呼んでいる。これら上述の考え方に基けば、生態系サービスは、①空間的な範囲で区分された類型景観毎に、②複数の項目からなるサービスを、③水・物質フラックスやそれによる物理的環境の関数として示されるサービス量（性能）として積算・評価すべきと考えられる。この手法（特に類型景観）を用いれば、施策群を戦略的に設計することが可能となり、河川流域環境の実用的かつ発展的なアセス技術として有用な診断法となるであろう。また、本評価手法を用いて生態系サービスの歴史的変化を分析すれば、将来のビジョンもより確度を持って設計することができると考えられる。次章以降では、矢作川流域を対象にした水・物質フラックス網の設計と生態系サービス評価への応用手法を説明していく。

3. 水・物質フラックス網の設計

本章では、生態系サービスの評価とその対応施策の設計を念頭に置いて、矢作川流域を対象に類型景観を区分し、それらを内包する集水区画を定義して、これを接続する水・物質フラックス網（河川網）を形成する方法を論ずる。

(1) 矢作川流域の概要

矢作川は、その源を中央アルプス（標高1,908m）に発し、平野部で巴川、乙川を合わせて、その後、矢作古川を分

派して三河湾に注ぐ幹川流路延長118km、流域面積約1830km²の一級河川（砂河川）である（図-1）。流域については、上流から中流にかけて香嵐溪などの景勝地に恵まれ豊かな自然環境を有するとともに、上流域からの土砂供給によって形成された沖積平野が下流域に大きく広がっている。この下流域一帯には、明治用水や枝下用水などの水資源開発によって豊かな農業生産基盤が形成されている。また、この地域は日本随一の工業生産地帯でもあり、集水域人口も約60万人であるなど矢作川にかかる負担は大きいことが予測される。実際に降水量の少ない年では本川流量の半分近くを資源利用しており、ダムによる土砂輸送の分断によって中流付近の砂床は礫床化しつつあるなど、近年は河川環境の深刻な変化²⁾³⁾が発現しつつある。本研究では、このような問題に対して、河川管理の必要性和施策の実効可能性などを考慮しつつ、多様な自然特性と人為的インパクトが共存している本河川流域を対象として選定した。

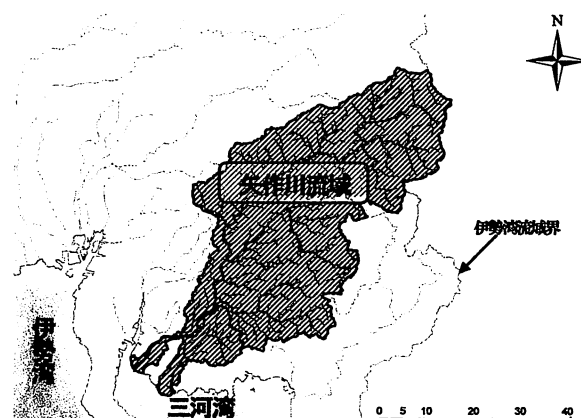


図-1 矢作川流域のGISマップ

(2) 類型景観の設定

類型景観としては長期的な環境形成の成り立ちと自然共生を考えれば“自然地形分類”を基本とすることが望ましい。また、人為的インパクトとしては“土地利用分類”があり、この分類には人口配置や土地開発の情報も織り込まれている。そこで本研究では、これら二つの分類のオーバーレイ（ユニオン）を類型景観の大分類と設定した。なお、類型景観には、中分類、小分類といった階層も設定しており、これらは大分類の景観に含まれている。本稿では、図-2に示したように自然地形分類と土地利用分類の空間分解能に大きな差があるため、標高に基づいて作成される地形（傾斜）を類型景観の自然地形指標として代用することとした。

(3) サブ集水区画とフラックス網（河川網）の設定

次に、サブ集水区画の定義とそれを接続するフラックス網の形成方法を説明する。先に述べたように、河川やその集水区画には地点毎に個性があること、また将来的

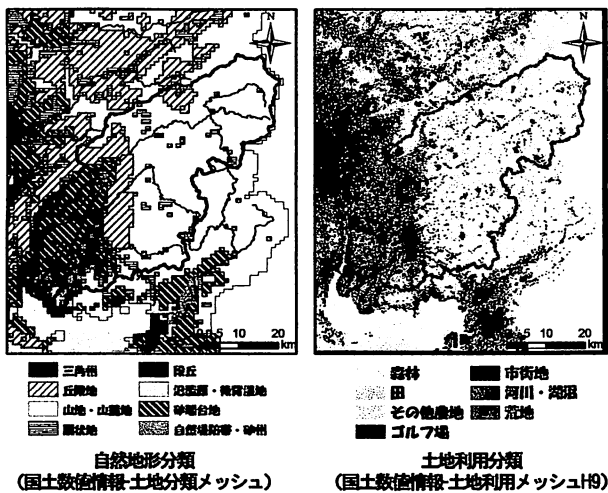


図-2 矢作川流域の自然地形分類と土地利用

には類型景観の典型的なパターンを普遍化（他流域への適用など）することなどを勘案すると、河川区間を適切なスケールを持って区切り、その後背地をサブ集水区画として定義することが望ましい。そのためには流域を河川区間に基つて小流域に区分する必要があるが、このための手法としては従来的に行われてきている分布型流域解析モデルのプリポスト機能が役に立つ。一般に良く用いられているArcGISのHydrology Modelingツール、WMS (Watershed Management System)、無償で利用可能なBASINS4（米EPA、<http://www.epa.gov/waterscience/basins/index.html>）などがある。いずれも標高を入力データとして任意の集水域を画定するツールである。本研究では、流路分解能の設定、河川合流地点、ダムなどの取水地点あるいは観測地点などの入力情報に基づいて、“サブ集水区画”と“フラックス網（河川）”を自動的に構築することの出来るBASINS4を用いた。作成されたサブ集水区画と地形特性（印影）をオーバーレイして図-3に示す。（図-3にはダムなどの施設、観測所を併記する。数値は、集水区画番号を示す。）

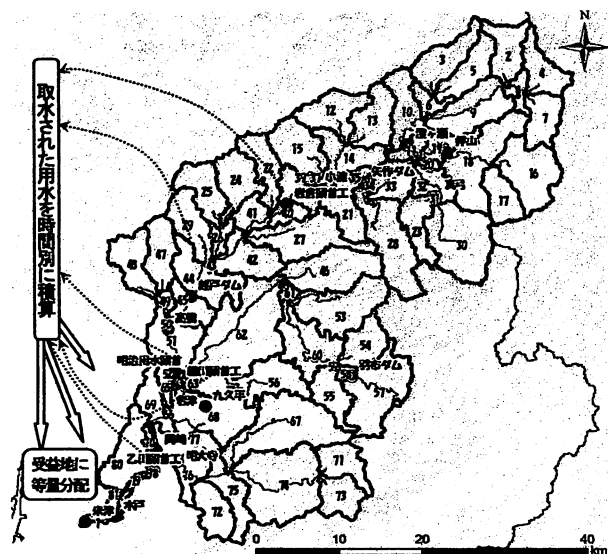


図-3 BASINS4で自動分割されたサブ集水区画

(4) 人為的フラックス網の設定

人為的フラックス網は、自然条件におけるフラックスに従わないネットワークを意味する。水については利排水過程がそれに相当し、物質については前述に加えて施肥や廃棄物、食料の流通などが相当する。本稿では、主に水と土砂粒子を対象として流域モデルを構築するため、人為的フラックス網としては図-3に示すように主要な利水施設による取水地点とそれらの受益地（農業用水の場合は水田、工業用水および上水道用水の場合は市街地）との接続を行った。なお、取水された水は流域内外の受益地へ各時刻において等量配分したが、本川への還流に影響するのは流域内の受益地相当分（水田に関しては約20%（3,500ha／17,000ha）⁴⁾、市街地については約30%⁵⁾）だけである。

4. 流域水文・水質統合モデルを用いた水・物質フラックスの推定

(1) 流域水文・水質統合モデルについて

矢作川流域では、上流の矢作第一ダムにおける堆砂、中下流における河床低下、沿岸域における干潟の減少などが問題になっており、流砂系の分断が生態系サービスへの影響となって明確に現れてきている。そこで本稿では、水文流出とそれにドライブされる物質として土砂粒子を設定し、流域水文・水質統合モデル（以降、水文モデルと表記する）を利用して現況の再現シミュレーションを試みた。先に設計したサブ集水区画とフラックス網をベースとして解析を行うため、時間と空間微分を扱うことの出来るいわゆる“分布型”の水文モデルが適している。また、水文とともに土砂粒子やその他の物質（栄養塩類、有機物、農薬など）の流出計算も同時に実施でき、将来的に生態系サービス評価モデルを導入することが可能であることなどの柔軟性・汎用性も確保されていることが必要である。

以上の条件を備えた水文モデルとして、本研究ではBASINS4－HSPF Ver.12（Hydrological Simulation Program Fortran, 米EPA）⁶⁾を用いることとした。BASINS4は水文モデルに入力するためのサブ集水区画やフラックス網の条件・特性をGISベースで定義するGUIソフトウェアで、これによって構築された流域地形特性ファイル（WSDファイル）を水文水質計算条件の設計ソフト（WinHSPF）に自動的に受け渡し、WinHSPF上で計算項目や利用する現象計算アルゴリズム、パラメータ、入出力ファイルなどを設定する。設定はGUI上で行うが、計算のための条件ファイル（User Control Inputファイル）は、同時並行的に自動で作成される。UCIファイルと降水量、可能蒸発散量、取水量などの時系列データを保存したWatershed Database ManagementファイルとをHSPFに入力することで、水文水質計算を実行することが出来る。HSPFは1966年に開発されたスタンフォード流域

モデルSWMを水文モデルのエンジンとして利用し、様々な改良を重ねて今日では様々な水質予測が可能になるなど本研究の要求を満たすレベルに達している。

HSPFで扱う流域は、陸域をサブ集水区画に分類し、その区画内の配置された河川・貯水域 (Reach and Reservoir) を流下方向に接続することによって記述されている。陸域は、さらに透水性 (PERLND) か不透水性 (IMPLND) によって二つに大別され、それぞれ異なる水文過程の計算を行っている。また、陸域における土砂粒子の流出に関しては、降雨強度や地表面状態などに依存する剥離過程と表面流出による浸食過程とが計算され、表面流出によってそれぞれの土砂粒子が河川・貯水域への輸送される。河川・貯水域では、各々の区画のF-TABLE (H-B, H-A, H-Qの関係を数表化したもの) を外部入力し、一次元不等流仮定に基づいた流量計算とともに掃流砂・浮遊砂の移動床計算を行う。小粒径 (シルト、クレイ) の土砂粒子には掃流限界と沈降・巻き上げ限界に関わる掃流力を設定し、砂粒子に関しては経験式 (exp型) でパラメータを設定する。その他の適用事例や詳細な水文過程および移動床過程の説明は、参考文献^{6)~8)}を参照されたい。

(2) 計算条件の設定と入力データの整備

生態系サービスの評価に向けて、例えば河川生態分野では冠水頻度、流況係数あるいは流入土砂特性に関わる指標がしばしば要求される⁹⁾。このため、本研究では降水量の多かった2004年の1年間を対象にした1時間単位の流量および土砂粒子負荷量 (三つの粒径 (2mm, 0.04mm, 0.005mm) を設定) の再現を目標とした。また、空間的には類型景観 (土地利用分類) の定義に基づき、①建物用地・幹線交通用地・その他用地 (不透水性陸域)、②水田、③その他農用地、④森林、⑤荒地、⑥その他 (②~⑥は透水性陸域) の六つに分類して、それぞれに水文パラメータを与えた。

HSPFによる計算には様々な物理的、経験的パラメータが類型景観分類毎に要求される。そのうち、地形学的特性 (区画面積、区画平均傾斜、流路長、流路傾斜など) はBASINSから自動的に設定し、限界掃流力は岩垣式、Rubey式に従って設定した。その他経験的パラメータの設定方法については、次節4.3で述べる。

HSPFにおいて最低限入力すべき気象データは、降水量と可能蒸発散量である。本研究では先に述べたように時間単位で与える必要がある。降水量に関しては、レーダーアメダス解析雨量 (降水量) の解凍プログラムを作成し、サブ集水区画毎に集計・平均してWDMファイルに時間単位で入力した (図-4)。近年は、この解析雨量が約1kmメッシュ、30分雨量で提供されるなど時空間的な分解能は益々向上している。可能蒸発散量については、名古屋地方気象台の実測気象条件をペンマン式に入力して日可能蒸発散量を算定し、WDMutil (BASINSに同梱さ

れているデータ管理ソフト) のdisaggregate関数を利用して (緯度を設定) して時間蒸発散量に変換した。

河川流量については図-3で示された各地点、取水量については人為的フラックス網の設定で述べた各地点、また、ダムにおける流入・放流量データについては矢作第一ダム、羽布ダム地点でそれぞれ整備された (図-3)。これらのデータの出典は、水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) と矢作川利水総合管理年報 (2004年、愛知県) である。

フラックス網の設定に関しては、基本的に前章で述べた設計に従うが、矢作ダム地点および羽布ダム地点での接続は解除し、直下流への流量はそれぞれ実測放流量で与え、土砂粒子負荷量に関しては各ダム流入負荷量の25%を直下流に与えることとした。これによってダムへの堆砂現象が再現可能となる。

(3) キャリブレーションの方法

パラメータの設定方法には、感度分析に基づいた最適化手法が有効である。本研究では最適化 (最小化) の目的関数を、①時間流量の誤差の年間累積値、②月流量の誤差の年間累積値および③複数の設定流量に対する超過確率誤差の累積値の3つの値の重み付き合計値として設定した。利用した最適化ソフト (PEST, BASINSに同梱) は、HSPFと連動が可能で任意のパラメータについて自動的に最適値を推定する。(Gauss-Marquardt-Levenbergアルゴリズム)

本研究で用いたパラメータ項目は、A: 上層およびB: 下層セグメントにおける貯留量、C: 下層への浸透速度、D: 中間流出係数の4つであり、類型景観毎の設定方法は以下の通りである。(1) 矢作第一ダム地点について、森林とそれ以外全ての2分類で計8つのパラメータを推定し、

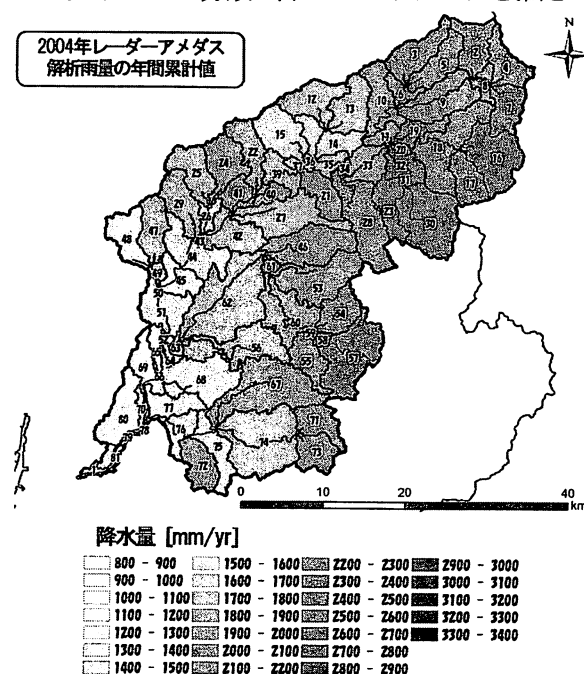


図-4 水文モデルに入力するサブ集水区画別降水量分布

(2) 森林に関わるパラメータを(1)の推定値で固定して、最下流の米津観測所地点について水田・農地グループと荒地・その他グループの計8つのパラメータを推定した後、(3)さらにそれを初期値として類型景観ごとのパラメータ推定に細分化していく。これによってパラメータ間の調整段階における発散を防ぐことが出来る。

一方、土砂粒子流出に関わるパラメータは、矢作ダムへの年間堆砂量を約50～60万トン¹⁰⁾、米津橋観測所地点の年間土砂粒子負荷量を約110万トン（児玉ら¹¹⁾のL-Q式に基づく推定値）になるように調整された。

5. 水・物質フラックスの推定結果

図-5に実測および計算された河川流量のハイドログラフを、また、米津橋観測所地点の相関関係を図-6に示す。上流地点と下流地点の両方で、出水時および平時時の流量が良く再現されていることが分かる。超過頻度についても概ね良好な再現性（図-7）を示しており、地形の形成や物質フラックスに大きな影響を及ぼす出水現象も本モデルで概ね推定できることが確認された。

図-8には、実測に基づいたL-Q式の値¹¹⁾を示し、この図に本モデルで推定された土砂粒子負荷量と流量の関係を併記した。この図から、両者の傾向は一致していることが確認された。なお、米津橋観測所地点における年間土砂粒子負荷量の計算値は、約118万トンとなりL-Q式に基づく年間負荷量（約112万トン）と同等レベルであった。

また、矢作第一ダムにおける年間堆砂量の計算値は約65万トンとなり、矢作第一ダムを通過する土砂粒子負荷量は22万トン程度であることが推察された。

推定の結果、一部の再現性にはやや検証の必要性があるものの、時空間的な水・土砂粒子フラックスが推定できたことによって、各類型景観にて生態系サービスを評価するための物理的環境の予測や直接的な説明変数が用意された。また、自然地形に順応した土地利用形態への転換、森林保全、ダム排砂などの施策オプションが水・物質フラックスに与える影響についても容易に評価することが可能になり、最適な施策をより定量的に評価できるツールが構築された。

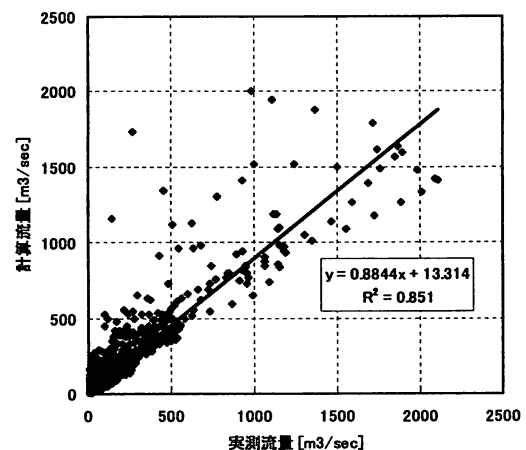


図-6 米津橋観測所地点における時間流量の再現性(相関)

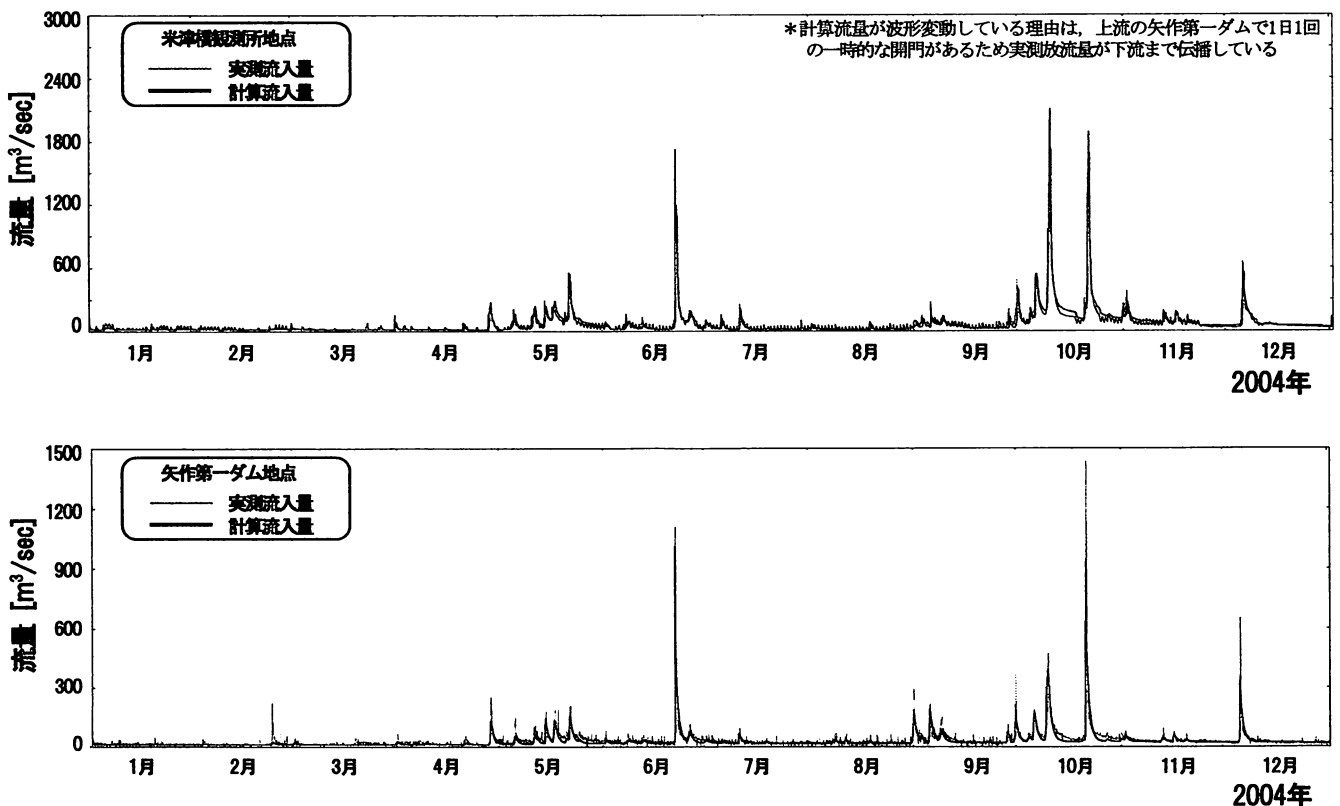


図-5 矢作第一ダム地点（下段）および米津橋観測所地点（上段）における時間流量の再現性（ハイドログラフ）

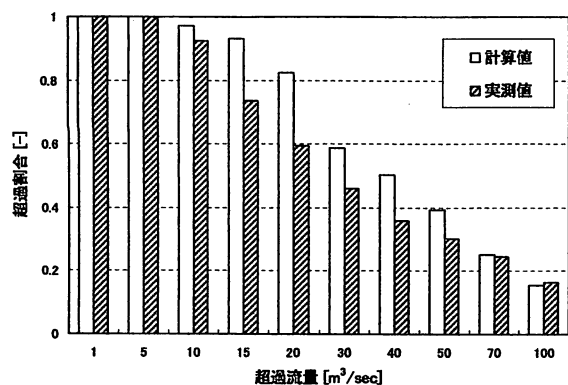


図-7 米津橋観測所地点における流量超過割合の再現性

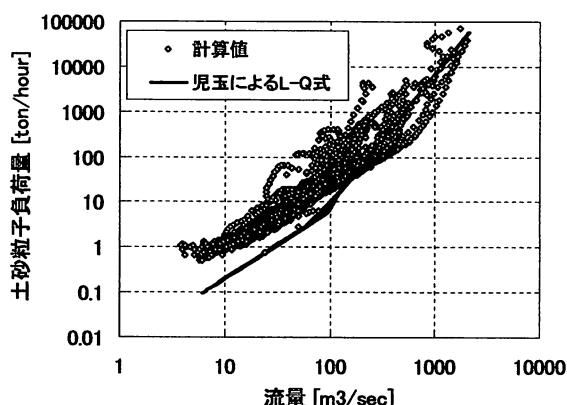


図-8 米津橋観測所地点における土砂粒子負荷量-流量の関係

7. おわりに

(1) 生態系サービス評価への展開

先に述べたように生態系サービスは、物理的環境によって支持され、水・物質フラックスはそれぞれに影響を与えている。例えば、矢作第一ダムで問題になっている堆積砂を直下流にフラックスとして放流することで、河川地形・河道景観はどのように変化し、その結果河川区間における生態系サービスはどのように評価できるか、昔の景観に戻るのか、治水機能は維持できるのか、また、長期的には一時しのぎの排砂計画ではなく、より根本的な森林保全の効果を比較論的にあるいは施策群としてセットで評価することが今後求められるだろう。

生態系サービスは、他に対する一方的な恩恵というよりは、バランスの上に成り立っている機能である。水質制御機能といった生態系サービスは、実際には水・物質動態と相互依存の関係にあり、施策はそのバランスを良い方向に変化させることを目指すものである。このことから、今後は本稿で構築された水・物質フラックス網の中に生態系サービスモデルを組み込んで、流域圏として統合評価していくことが必要である。

(2) まとめ

本研究では、サブ集水区画とそれを接続するフラックス網を設計する具体的な手法を示し、矢作川流域を対象に適用を試みた。また、流域水文・水質統合モデルを矢作川流域のフラックス網に適用し、陸域および河川域における流量・土砂粒子負荷量を時間単位で再現する手法を示した。2004年の1年間の再現計算を行った結果、本手法の有効性が確認された。さらに本研究で提案する水・物質フラックスモデルは、政策シナリオ（施策群の設計）に対応するよう類型景観の考え方を基本とし、生態系サービス評価モデルとの連携を念頭に置いて設計されたものである。今後は、物質項目を拡張（栄養塩類や有機物など）し、水・物質フラックスモデルとしての普遍性を検証するとともに、生態系サービス評価モデルの導入を目指していきたい。

謝辞：本研究は、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」の助成を受けて遂行されました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Robert Costanza, *et.al*: The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, Vol.387, pp.253-260, 1997.
- 2) Yuji TODA, Tetsuro TSUJIMOTO, Takuro IKEDA and Yuki TADAKUMA: Interaction between flow and growth of periphyton in sand river, *River Flow*, Vol.2, pp.2073-2080, 2006.
- 3) 内田臣一ら：矢作川におけるカワヒバリガイの大量発生後の大量死, 矢作川研究, No.11, pp.35-46, 2007.
- 4) 愛知県西三河農林水産事務所：矢作川水系利水総合管理資料 2003.
- 5) 国土交通省：矢作川河川整備基本方針資料, http://www.mlit.go.jp/river/gaiyou/seibi/yahagigawa_in dex.html.
- 6) Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Donigan, A.S. and Johanson, R.C.: Hydrological Simulation Program- Fortran, user's manual for version 11, *Rep. No. EPA/600/R-97/080*, U.S.EPA, 1997.
- 7) 山下隆男, 嵯峨拓朗：流域水文モデルHSPFによる沿岸海域への物質輸送シミュレーション, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1101-1105, 2005.
- 8) Seiji Hayashi, Shogo Murakami, Masataka Watanabe and Xu Bao-Hua: HSPF Simulation of Runoff and sediment Loads in the Upper Changjiang River Basin, China, *J. of Env. Eng. ASCE*, pp.801-815, 2004.
- 9) 井上優, 大沼克弘, 藤田光一：流水と土砂の作用による立地条件変化に着目した植生消長の簡易計算手法の開発, 河川技術論文集, 第12巻, 2006.
- 10) 矢作ダム貯水池総合管理計画検討委員会資料, 2007.
- 11) 児玉真史, 小松幸生, 岡本俊治, 黒田伸郎, 荒川純平, 村上真裕美：河川流量の制御による内湾環境改善の可能性, 用水と廃水, Vol. 50, No. 2, pp. 155-161, 2008.

(2008. 4. 3受付)