

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

高岡 広樹¹・戸田 祐嗣²・辻本 哲郎³

¹正会員 名古屋大学研究員 大学院工学研究科 (〒464-8603名古屋市中千種区不老町)

E-mail:takaoka@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603名古屋市中千種区不老町)

E-mail:yododa@cc.nagoya-u.ac.jp

³フェロー会員 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603名古屋市中千種区不老町)

E-mail:ttsujimoto@env.nagoya-u.ac.jp

流域は水・物質循環のフラックス網で記述され、それが流域のさまざまな「景観」を通過するときに、各地先でフラックスが変化を受ける。生態系劣化の修復や生態系サービスのより進んだ享受のための施策は、地先景観でのフラックス変化を伴うため、施策評価を行うアセスメントの枠組みでは、それらのフィードバックを試行的かつ簡便に行える水・物質循環モデルの作成が必要である。そこで、本研究では、施策の効果をフラックス網にフィードバックできる水・物質循環モデルを構築した。

Key Words : flux network, ecosystem service, hydrological simulation model, Yahagi River basin

1. はじめに

著者は、自然共生型流域圏構築の駆動力としての生態系サービスを指標としたアセスメント技術の開発を目指している¹⁾。そこでは、流域は水・物質循環のフラックス網で記述され、それが流域のさまざまな「景観」を通過するときに地先に蓄積する生態系サービスを流域で統合して評価しようとするものである。このとき、各地先ではフラックスが変化を受け、それらはフラックス網にフィードバックされる。生態系劣化の修復や生態系サービスのより進んだ享受のための施策は、地先景観でのフラックス変化を伴うため、施策評価を行うアセスメントの枠組みでは、それらのフィードバックを試行的かつ簡便に行える水・物質循環モデルの作成が必要である。

そこで、本研究では、施策の効果をフラックス網にフィードバックできる水・物質循環モデルを構築した。モデルでは、雨水の流出とそれに伴う物質の流出（自然系）および生活排水などの人工系の流出を考慮する。また、本モデルを実河川流域に適用し、モデルの妥当性を検証した。

2. 水・物質循環モデルの構築

本研究では、地先景観による施策効果のフィードバック

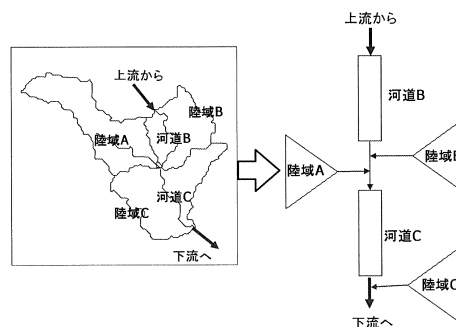


図-1 流域のモデル化

クを簡便に行うことができ、かつ、他流域への適用性を保持したモデル構築を行うこととする。そこで、対象流域を小流域に分割し、小流域の繋がりによりフラックス網を評価する（図-1参照）。さらに、小流域を河道と後背地の陸域とに分け、それぞれ河道モデル、陸域モデルによりフラックスを解析する。解析対象項目は、流量、COD、T-N、T-P、SSとした。陸域モデルでは、降水の河道への流出とそれに伴う物質流動を解析する。河道モデルでは、陸域から河道への流出量を入力条件として、流量、物質の挙動を解析する。

加えて、河川流量の利排水過程や生活排水による負荷の流出等について、人工系モデルにより評価する。

(1) 陸域モデル

陸域モデルでは、降雨の河道への流出とそれに伴う物質流動を解析する。

a) 降雨流出

降雨の流出解析には、表面・中間流出成分と地下水流出成分とに分けた2段タンク型貯留関数モデル²⁾を用いる(図-2)。1段目の表面・中間流出成分へ非線形貯留関数法を適用し、2段目のタンクについては、線形モデルを採用した。1段目タンクの基礎式を以下に示す。

$$\begin{aligned} s_1 &= k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \\ \frac{ds_1}{dt} &= r - q_1 - f_1 \\ f_1 &= k_{13}q_1 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 s_1 ：1段目タンク貯留高(mm)， r ：観測雨量(mm/h)， q_1 ：表面・中間流出高(mm/h)， f_1 ：1段目タンクから2段目タンクへの浸透供給量(mm/h)， k_{11} ， k_{12} ：貯留係数， k_{13} ：損失係数， p_1 ， p_2 ：貯留指数である。

1段目の損失分 f_1 は浸透供給量として、すべて2段目タンクへの入力とした。また、 k_{11} ， k_{12} ， p_1 ， p_2 については、実測流量による同定を行わないこととし、以下の値³⁾とした。

$$\begin{aligned} k_{11} &= 2.823 \left(n / \sqrt{I} \right)^{0.6} A^{0.24} \\ k_{12} &= 0.2835 k_1^2 \left(\bar{r}_e \right)^{-0.2648} \\ p_1 &= 0.6 \\ p_2 &= 0.4648 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 n ：等価粗度， I ：平均勾配， A ：流域面積(km²)， $\bar{r}_e$ ：平均有効雨量強度(mm/h)である。また、損失係数 k_{13} は流出係数 f で近似した。

2段目タンクの基礎式は、以下のようである。

$$\begin{aligned} s_2 &= k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt} \\ \frac{ds_2}{dt} &= f_1 - q_2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 s_2 ：2段目タンク貯留高(mm)， q_2 ：地下水流出高(mm/h)， k_{21} ， k_{22} ：係数であり、地下水流出成分の分離時定数を T 。減衰係数を δ とすると、

$$k_{21} = \frac{\delta^2}{T_c} k_{22}, k_{22} = k_{13} \left(\frac{T_c}{\delta} \right)^2 \quad (4)$$

と表される³⁾。

また、河道への流出流量は

(表面・中間流出成分) (地下水流出成分)

$$Q_1 = \frac{1}{3.6} q_1 A \quad Q_2 = \frac{1}{3.6} q_2 A \quad (5)$$

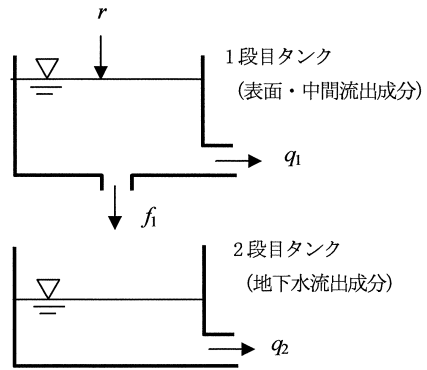


図-2 2段タンク型貯留関数モデル

表-1 降雨水質，地下水水質の仮定値 (g/m³)

項目	COD	T-N	T-P	SS
降雨水質	1.538	0.826	0.035	0
地下水水質	0.769	0.413	0.017	0

(全流出流量)

$$Q_b = Q_1 + Q_2 = \frac{1}{3.6} q A \quad (6)$$

となる。また、下水道処理区域に降った雨については、下水処理場に運ばれ、処理排水として流出するとした。

b) 物質(COD・T-N・T-P・SS)の流出

陸域から河道への物質の負荷として、降雨からの負荷、表面流出による負荷、地下水からの負荷を考慮した。

降雨からの負荷については、降雨水質を表面流出量に乗じることで負荷を算出し、地下水からの負荷についても同様に、地下水水質を地下水流出量に乗じることで負荷を算出した。降雨水質については、観測値がないため、他流域の値⁴⁾を基に仮定し、地下水水質は降雨水質の半分を仮定した。表-1に降雨水質，地下水水質の仮定値を示す。

降雨時の地表面から発生する負荷は、負荷堆積量を考慮した雨天時流出負荷量算定モデル⁵⁾を用いた。このモデルは以下の式により表現される。

$$\begin{aligned} L &= k \times S^m \times (Q_1 - Q_c) Q_1^n \\ \frac{dS}{dt} &= \begin{cases} \Delta S & (\text{晴天時}) \\ -L_s & (\text{降雨時}) \\ 0 & (S \geq S_{\max} \text{ or } S = 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 L ：表面流出負荷量， Q_1 ：表面流出量， Q_c ：限界流量， S ：堆積負荷量， k ， m ， n ：パラメータである。また、表面流出量 Q_1 は貯留関数法による解析結果を用いる。このモデルは、降雨時に表面流出により、堆積負荷量に応じた負荷が発生し、その分 S は減少する。晴天時には、 ΔS により S が回復する。パラメータ k ， m ， n は表-2に示すように物質毎に、土地利用別に設定した。

表-2 表面流出負荷量算定パラメータ

	地目名	山林	市街地	水田	水面	畑地
k	COD	0.001	0.003	0.002	-	0.002
	T-N	0.0005	0.002	0.001	-	0.001
	T-P	0.0001	0.0004	0.0002	-	0.0003
	SS	0.5	0.5	0.5	-	0.5
m	COD	0.5	0.5	0.5	-	0.5
	T-N	0.5	0.5	0.5	-	0.5
	T-P	0.5	0.5	0.5	-	0.5
	SS	0	0	0	-	0
n	COD	1	1	1	-	1
	T-N	1	1	1	-	1
	T-P	1	1	1	-	1
	SS	1	1	1	-	1
S_{max} (g/m ²)	COD	0.5	2.5	2	-	2
	T-N	0.1	1.5	2	-	2
	T-P	0.005	0.025	0.01	-	0.01
	SS	1	1	1	-	1
ΔS (g/m ² ・day)	COD	0.05	0.25	0.2	-	0.2
	T-N	0.01	0.15	0.2	-	0.2
	T-P	0.0005	0.0025	0.001	-	0.001
	SS	1	1	1	-	1
Q_c (m ³ /s)	COD	0	0	0	-	0
	T-N	0	0	0	-	0
	T-P	0	0	0	-	0
	SS	0	0	0	-	0

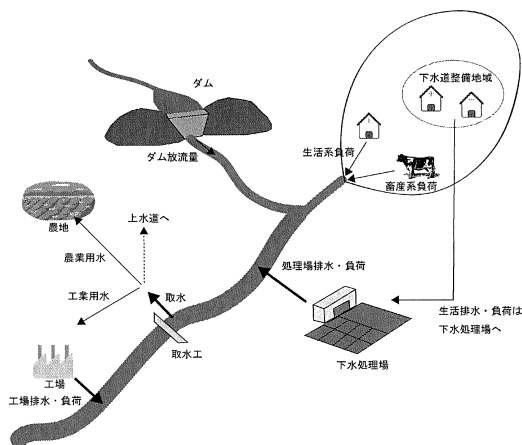


図-3 人工系モデルのイメージ図

(2) 河道モデル

河道モデルでは、陸域モデルから河道への流出量を入力条件として、流量、物質の挙動を解析する。

a) 河道流量

貯留関数法により河道の流出解析を行う。基礎式は以下のようである。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = Q_m - Q \quad (8)$$

$$H = KQ^P$$

ここに、 Q_n ：河道上端に接続する小流域からの総流入流量(m³/s)、 Q ：流出流量(m³/s)、 H ：見かけの貯留量(m³)である。また、 K 、 P ：定数であり、河道断面を矩形と仮定し、マニングの粗度係数0.03として等流計算により算定する。

b) 物質(COD・T-N・T-P・SS)

河道における物質の挙動は、河川の浄化機能を考慮する。上流から流入する物質の濃度を C_n とすると河道下流から流出する物質の濃度 C は

$$C = C_n e^{-kt} \quad (9)$$

で表される。ここに、 k ：浄化係数であり、物質ごとに設定した。

(3) 人工系モデル

人工系モデルでは、ダムの放流や取水工の取水による流量変化について、大規模なものを対象にモデル化を行う。また、生活や畜産、工場排水に伴う物質の河道への流入を解析する。人工系モデルのイメージを図-3に示す。

a) ダムによる流量変化

ダムの放流量は、ダムの目的(治水・利水・農業)により大きく異なるため、それぞれのダムについてモデル

表-3 生活系排出負荷量 (g/人/day)

処理形態	下水処理場	合併浄化槽	単独浄化槽	計画収集	自家処理	未処理
COD	11	28	22	22	22	22
T-N	6.7	11	3.9	3.9	3.9	3.9
T-P	0.9	1.2	0.4	0.4	0.4	0.4
SS	13	54	50	50	50	50

化を行う。各ダムには操作規則があるため、操作規則を優先的に考慮し、実測の流入量および放流量から、ダムによる流量変化をモデル化する。また、放流水の水質については、貯水池内に滞留している間に変化するが、ここでは、流入水質と同じ濃度とした。

b) 取水工による流量変化

取水の利用目的(上水用、農業用、工業用)により、取水量が大きく異なるが、上水用、工業用の取水については、年間を通してほとんど変動がないため、一定とした。農業用については、冬季は少なく、4月から夏季にかけて著しく増加するため、月ごとに一定とし、実測値より算出した月別の平均値とした。取水量の水質は、河川水質と同じ濃度とした。

c) 生活系負荷

生活系負荷については、排水の処理形態別に負荷を算出する。処理形態は、下水処理、合併浄化槽、単独浄化槽、計画収集、自家処理、未処理とした。まず、小流域内の処理形態別人口を算出し、下水処理以外について処理形態別1人当たりの排出負荷⁹⁾により負荷を計算し、小流域末端に接続する河道へ流入させる。処理形態別排出負荷を表-3に示す。

処理形態が下水処理に該当する場合は、生活系負荷は下水処理場に運ばれ、処理場の排水地点において河道へ排水量、負荷を流入させる。

d) 畜産系負荷

畜産系負荷については、小流域内の牛、豚、鶏の数を算出し、1頭、1羽当たりの排出負荷⁹⁾(表-4)により総排出負荷を求め、河道へ流入させる。

表-4 畜産系排出負荷 (g/頭・羽/day)

項目	COD	T-N	T-P	SS
牛	53	30	4.5	100
豚	13	5.6	6	16
鶏	0.37	0.225	0.075	0

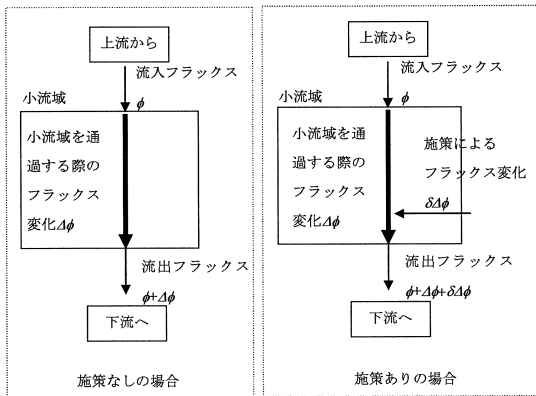


図-4 施策効果のフィードバックの模式図

e) 工業系負荷

工業系負荷については、小流域内の工場からの排水量、排出負荷を算出し、河道へ流入させる。

生活系、畜産系、工業系の排出負荷については、降雨などの条件によらず、一定値で河道へ流入するとした。

(4) 施策効果のフィードバック

ある地先で施策が実施された場合、その成果としてのフラックス変化は、流域全体に伝播するものであり、フラックス網にフィードバックされなければならない。

本モデルでは、流域を小流域に分割し、小流域のネットワークでフラックス網を表現している。ある小流域へ流入するフラックスを ϕ とし、小流域を通過する際のフラックス変化を $\Delta\phi$ とすると、施策を実施しない場合、流出するフラックスは $\phi + \Delta\phi$ となる。

一方、施策を実施した場合、施策効果によるフラックス変化を $\Delta\Delta\phi$ とすると、流出するフラックスは $\phi + \Delta\phi + \Delta\Delta\phi$ となる。これを下流域の流入フラックスとすることで、施策効果が下流へ伝播し、流域全体として評価することが可能である。施策効果のフィードバックの模式図を図-4に示す。

3. 水・物質循環モデルの適用

構築した水・物質循環モデルを現地流域に適用した。対象流域は、一級河川矢作川であり、比較的降水量の多かった2004年の1年間を対象とした。

(1) 矢作川流域の概要

矢作川は、その源を中央アルプスに発し、平野部で巴



図-5 矢作川位置図

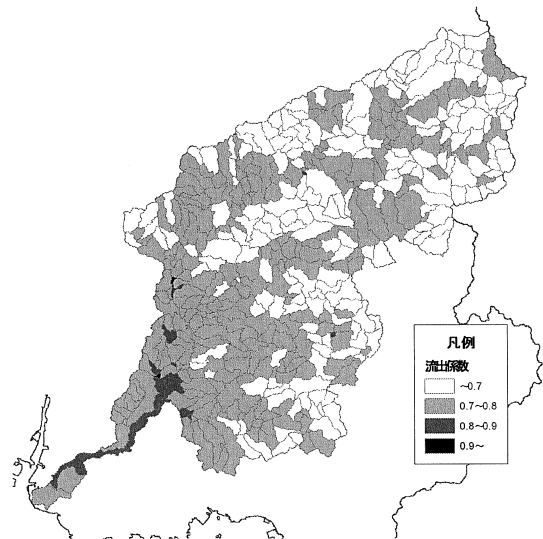


図-6 流出係数

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線流路延長118km、流域面積約1830km²の一級河川である(図-5)。

(2) 解析条件

まず、矢作川流域を、河川合流点を考慮し、481の小流域に分割した⁷⁾。小流域ごとに流域面積、河道長、平均勾配などの地形特性を整理し、土地利用について、森林、畑地、水田、市街地、水面の割合を算出した。土地利用割合を基に、流出係数および等価粗度を算定した。算定した流出係数を図-6に示す。

陸域モデルの入力条件となる雨量データについては、各小流域の近隣のアメダス観測点における実測雨量を与えた。

人工系モデルとして、矢作ダム、羽布ダムの2ダムに



図-7 ダム、取水工位置図

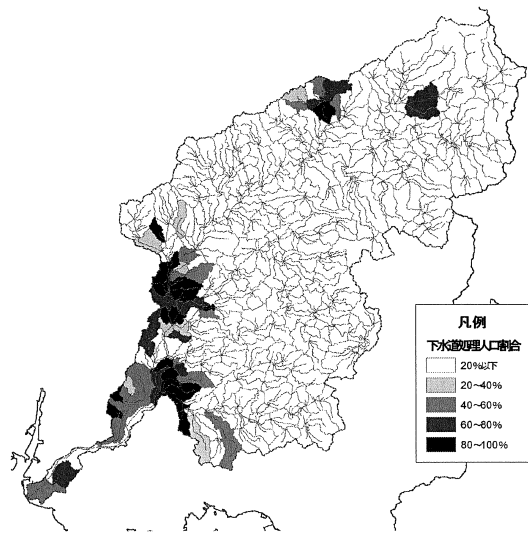


図-8 下水処理人口割合

ついて、放流量のモデル化を行い、明治用水頭首工、細川頭首工、岩倉取水工、乙川頭首工、越戸ダム（枝下用水）の5箇所の取水工をモデル化した。ダムおよび取水工の位置を図-7に示す。

また、小流域ごとの人口を整理し、排水処理形態別に人口を算出した。小流域内の総人口に対する下水処理人口の割合を図-8に示す。

下水処理場として、明智浄化センター、上矢作浄化センター、八帖下水処理場、豊田終末処理場、鞍ヶ池浄化センター、矢作川浄化センターの6箇所を考慮した。矢作川浄化センターの排水は三河湾へ直接流入させる。処理場の位置および処理区域を図-9に示す。また、各処理場からの排水量、負荷量について表-5に示す。

(3) 解析結果

図-10に米津橋観測所（図-5参照）における河川流量のハイドログラフの解析結果と実測値を示す。解析結果は実測値よりもやや大きな値となっているが、洪水の出水時間はほぼ一致している。しかしながら、大洪水時のピークの値が一致していない。これは、陸域の入力雨量として観測所の雨量を与えており、雨量データの空間分布を考慮していないためと考えられる。

図-11に矢作川本川における年間総流量の縦断方向変化を示す。同図には、観測点における実測値も示している。解析結果は実測値よりもやや過大となっているが、ほぼ一致している。貯留関数法の定数を同定しなくとも、ある程度再現性を確保できることが分かる。

解析結果では、矢作川から三河湾へ流出する年間の総負荷量は、COD=17,000(ton/year)、T-N=10,000(ton/year)、T-P=600(ton/year)となり、既存研究の結果⁸⁾とほぼ一致している。



図-9 下水処理場位置図

表-5 下水処理場排出負荷

処理場	排水量 (m ³ /day)	COD (g/m ³)	T-N (g/m ³)	T-P (g/m ³)	SS (g/m ³)
明智浄化センター	291.07	2.2	26.4	1.85	15
上矢作浄化センター	73.6	14.7	4.4	1.7	2
八帖処理場	20430.6	11	2.2	0.39	1
豊田終末処理場	10296.6	10	11.4	0.62	9
鞍ヶ池浄化センター	334.61	4.5	12.9	0.9	5
矢作川浄化センター	132672.9	6.2	5.8	0.6	1

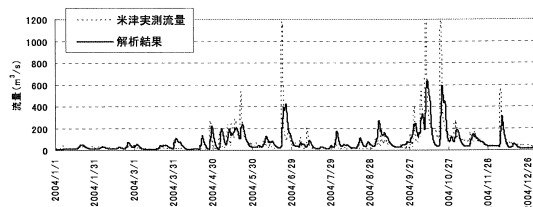


図-10 米津観測点における流量の解析結果

今後は、解析結果の精度向上や各種パラメータの設定方法を確立する必要がある。

4. おわりに

本研究では、流域フラックス網を記述する水・物質循環モデルを構築した。本モデルでは、流域を小流域に分割し、小流域ごとに陸域モデル、河道モデルを用いて解析した。また、ダムや取水工による流量変化や生活系、畜産系、下水処理場の排出負荷について、人工系モデルにより考慮した。本モデルでは、施策を実施する小流域からの流出に施策効果による変化量を考慮することにより、施策効果が下流へ伝播し、流域全体として施策評価が可能である。

作成したモデルを用いて、一級河川矢作川を対象に2004年の1年間について水・物質の流出解析を行った。その結果、実測値や既存研究の結果とほぼ一致しており、モデルの再現性を確認できた。

今後は、さらなるモデルの精度向上を目指すとともに、施策の効果をフラックス網にフィードバックし、施策効果を流域全体で評価する必要がある。

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（代表 辻本哲郎）」の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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。

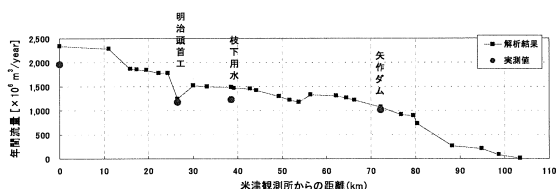


図-11 年間総流量の縦断方向変化

- 2) 園山裕士，星清，橋本識秀：実用的 2 段タンク型貯留関数法の提案，土木学会北海道支部論文報告集，第 58 号，pp.336-339，2002。
- 3) 土木学会：水理公式集[平成 11 年版]，pp.41，丸善(株)，1999。
- 4) 藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：水物質循環モデルを活用した水環境政策評価～霞ヶ浦とその流域を対象として～，国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告，自然共生型流域圏・都市の再生資料集（Ⅱ），No. 299，2006。
- 5) 和田安彦：ノンポイント負荷の制御，都市の雨水流出と負荷制御法，技報堂出版，1994。
- 6) 菊池佐智子，藤田光一，望月貴文：伊勢湾流域 1950-2000 年における人間活動と物質負荷に着目した環境変遷の分析，河川技術論文集，第 14 巻，pp. 379-384，2008。
- 7) 佐藤圭輔，椿涼太，戸田祐嗣，辻本哲郎：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，河川技術論文集，第 14 巻，pp.373-378，2008。
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：流域における物質循環の動態と水域環境への影響に関する研究，国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告，No. 28，2009。

HYDROLOGICAL & MATERIAL CYCLE SIMULATION MODEL FOR ECO-COMPATIBLE RIVER BASIN MANAGEMENT

Hiroki TAKAOKA, Yuji TODA and Tetsuro TSUJIMOTO

A river basin is an assembly of flux net work. It is recognized that ecosystem in a river basin plays a role to change the fluxes and to bring ecosystem service.

The purpose of this study is to develop hydrological and material cycle simulation model. This simulation model is composed of two parts: slope and river channel. The model contains to artificial flux changes such as dam, life drainage and sewage disposal plant. This model has been applied to the Yahagi River basin. As a result, we found that the simulation results agree with field measurements.