

1950年と2004年における矢作川流域からの 流出負荷量について

CHANGE OF RUNOFF DISCHARGE AND MATERIALS IN 1950 AND 2004
FROM THE YAHAGI RIVER BASIN

高岡広樹¹・戸田祐嗣²・辻本哲郎³

Hiroki TAKAOKA, Yuji TODA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学研究員 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³フェロー会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

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. It is important to know the influence that the land use gives runoff discharge and materials in suitable ecosystem service.

We developed hydrological and material cycle simulation model and applied it to the Yahagi River basin. In this study, we estimate the runoff discharge and materials in 1950 and 2004 using the hydrological and material cycle simulation model.

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

1. はじめに

著者らは、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、著者らは、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した水・物質循環モデルを構築し、モデルの妥当性を検証した²⁾。

また、流域の長期的な環境管理には、水・物質の循環、土地開発や人口増加などの人間活動について予測する必要がある、土地利用や人口の変遷による流出負荷量の変化を把握することが重要である。



図-1 矢作川位置図

菊池ら³⁾は、伊勢湾流域を対象に、1950年から2000年までの土地利用や人口の変化について整理し、原単位法により排出負荷を算出している。

原単位は1日もしくは年間を通しての値であるため、雨水流出に伴う物質の流出過程を評価することは不可能であり、また、その定性的評価は未だ不十分である。

そこで、本研究では、構築した水・物質循環モデルを

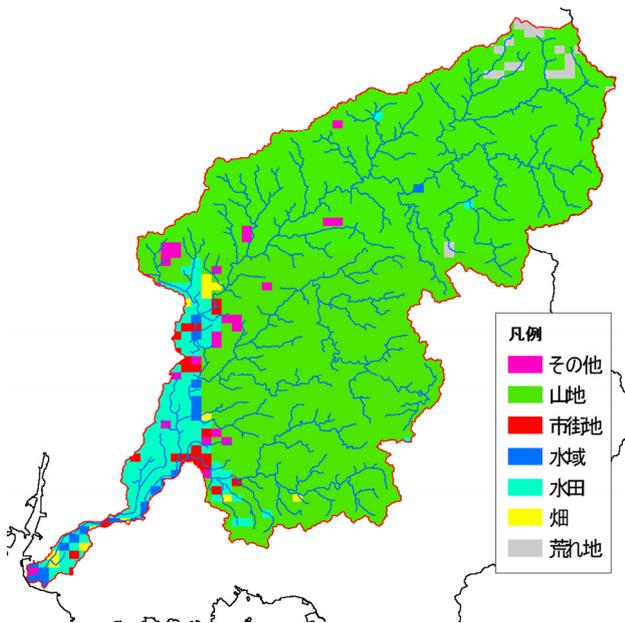


図-2 矢作川土地利用図 (1950年)

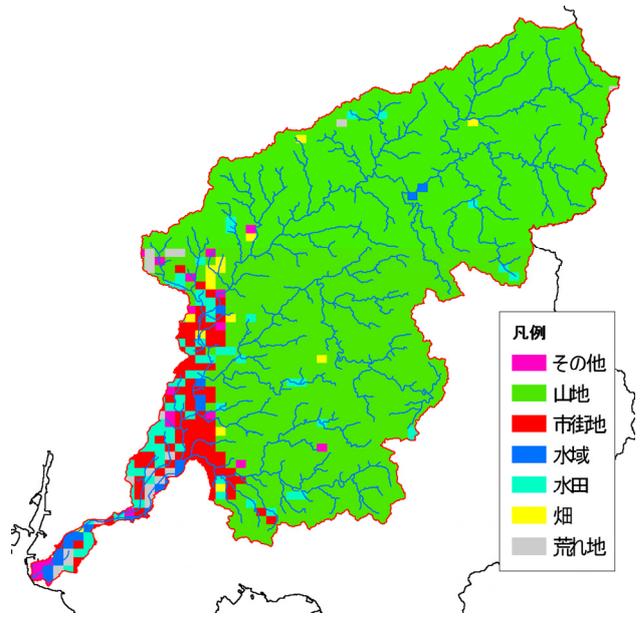


図-3 矢作川土地利用図 (2004年)

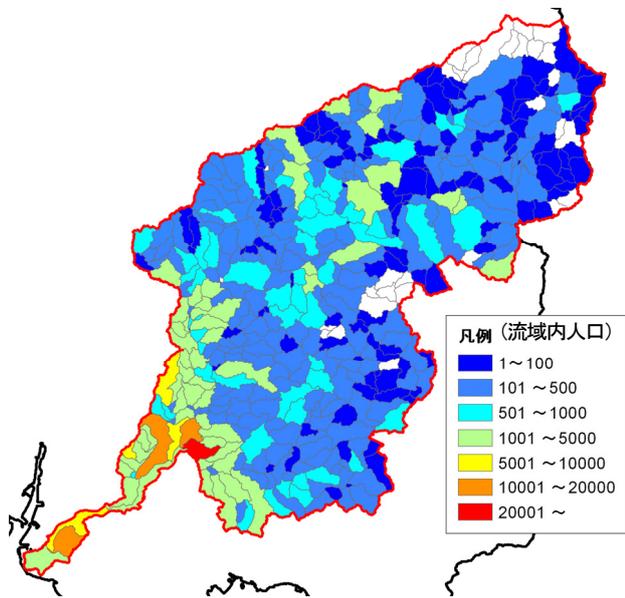


図-4 人口分布 (1950年)

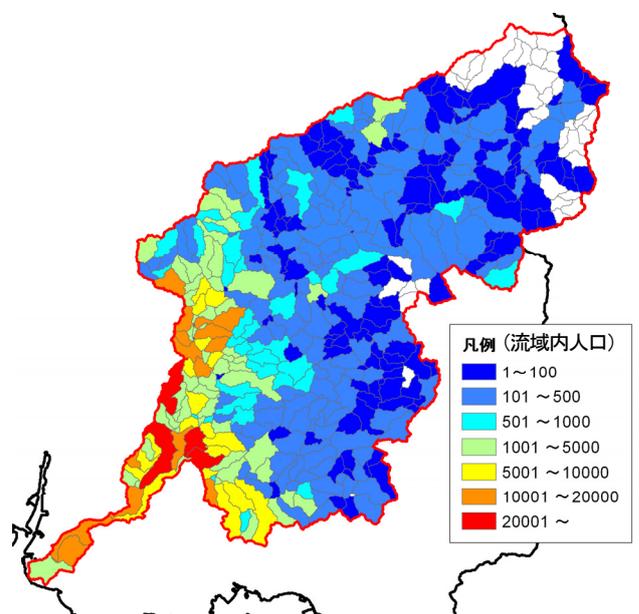


図-5 人口分布 (2004年)

用いて、一級河川矢作川流域を対象に、土地利用や人口が大きく異なる1950年と2004年について、水・物質の流出解析を行い、流出流量、負荷量について考察した。

2. 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1,830km²の一級河川である(図-1)。矢作川流域について、1950年および2004年の土地利用、流域内人口、下水処理形態別人口、家畜頭数、工業系の負荷量を整理した。1950年のデータについては、菊池ら³⁾が整理したデータを使用した。

表-1 土地利用面積割合 (%)

	1950年	2004年	増減
その他	2.0	2.6	0.6
山地	73.6	74.5	0.9
市街地	3.0	5.6	2.6
水域	2.1	2.0	-0.1
水田	12.3	9.3	-3.0
畑地	3.8	4.5	0.7
荒地	3.2	1.4	-1.8
合計	100	100	0

(1) 土地利用

図-2、図-3に1950年および2004年の土地利用区分をそれぞれ示す。1950年では、下流域は主に水田に利用されており、上流域はほとんど山地である。一方、2004年では、下流域の水田の多くが、市街地に変化していることが分かる。面積割合を見ると(表-1)、水田の割合が減

表-2 排水処理形態別人口 (人)

	1950年	2004年
下水処理場	0	341,732
合併浄化槽	0	58,724
単独浄化槽	20,816	173,533
計画収集	7,882	46,960
自家処理	201,160	495
未処理	77,114	6,945
合計	306,972	628,389

表-3 家畜頭数 (頭・羽)

	1950年	2004年
牛	7,411	13,391
豚	1,559	27,135
鶏	55,125	1,002,893

表-4 工業系排出量

	1950年	2004年
工業排水 (m^3/day)	19,307	219,661
COD (g/day)	277,836	16,927,983
T-N (g/day)	154,285	9,157,756
T-P (g/day)	9,228	555,022

少しているのに対し、市街地が約2倍に増加している。しかしながら、山地面積はほぼ変わっておらず、矢作川流域では、主に下流域の水田が市街化していることが分かる。流域全体で見ると、土地利用の変化は小さい。

(2) 流域内人口

図-4、図-5に矢作川流域の人口分布を示す。特に下流域では、市街化に伴い人口増加が著しい。一方、上流の山地部では、過疎化している場所も見られる。1950年の総人口は、約30.7万人、2004年は約62.8万人であり、倍増していることが分かる。

(3) 下水処理形態

表-2に下水処理形態別の人口を示す。1950年は、矢作川流域に下水処理場が存在せず、総人口のおよそ9割が自家処理と未処理である。一方、2004年では、下水処理場や浄化槽が整備され、人口の半数が下水処理場である。

(4) 家畜頭数

表-3に家畜頭数を示す。豚、鶏の飼育頭数が著しく増加していることが分かる。

(5) 工業系負荷量

工業系負荷量の算出は、出荷額当たりの負荷量比により算出した。算出した工業排水と排出負荷を表-4に示す。排水量は10倍程度に増加しており、負荷の排出が著しく増加していることが分かる。

3. 水・物質の流出解析

1950年と2004年を対象に、水と物質の流出解析を行う。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、小流域の繋がりによりフラックス網を評価する⁴⁾。さらに、小流域を陸域と河道とに分け、それぞれについて流出解析を行う。解析対象項目は、流量、COD、T-N、T-P、SSとした。以下に流出解析モデルの概要を示すが、詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

(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

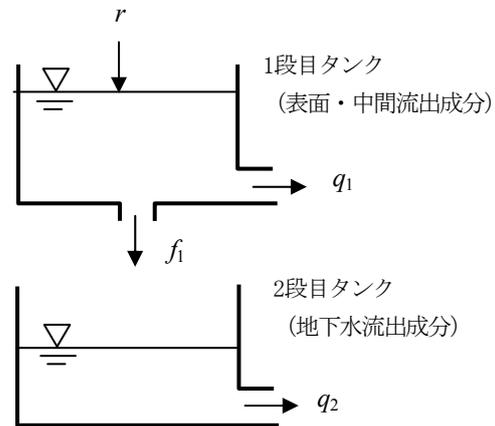


図-6 2段タンク型貯留関数モデル

質流動を解析する。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。本研究では、土地利用や人口の変化による流出負荷量の違いを評価することを目的としているため、雨量データについては、2004年の観測雨量を使用することとする。

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⁵⁾を用いる(図-6)。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段目の損失分 f_i 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、パラメータについては、同定は行わず、水理公式集⁶⁾に記載されている式より算出した。

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により負荷を算出し、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により算出した。降雨水質については、実測値がないため、他流域で用いられた値⁷⁾を使用し、地下水水質は降雨水質の半分を仮定した。

表-5 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	0.0045	0.0028	-	0.0012
	T-N	0.0005	0.002	0.0015	-	0.0035
	T-P	0.00007	0.00047	0.00065	-	0.00017
	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	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	1	1	1	-	1
S_{max} (g/m ²)	COD	0.551	1.369	1.222	-	0.559
	T-N	0.125	0.322	0.331	-	0.092
	T-P	0.0048	0.0192	0.039	-	0.0105
	SS	1	1	1	-	1
ΔS (g/m ² day)	COD	0.00551	0.01369	0.01222	-	0.00559
	T-N	0.00125	0.00322	0.00331	-	0.0092
	T-P	0.000048	0.000192	0.00039	-	0.000105
	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

降雨時の表面流出による負荷は、負荷堆積量を考慮した雨天時流出負荷量算定モデル⁸⁾を用いた。このモデルは以下の式により表現される。

$$L = \begin{cases} k \times S^m \times (Q - Q_c) Q^n & S < S_{max} \\ k \times S_{max}^m \times (Q - Q_c) Q^n & S > S_{max} \end{cases} \quad (1)$$

$$S = S_0 - \int L dt + \Delta S$$

ここに、 L ：表面流出負荷量 (g/s)、 Q ：表面流出量 (m³/s)、 Q_c ：限界流量 (m³/s)、 S ：堆積負荷量 (g)、 S_0 ：初期堆積負荷量 (g)、 k, m, n ：パラメータである。また、 Q は降雨の流出解析結果を用いる。このモデルは、降雨時の表面流出により、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、全陸域からの表面流出負荷量の総和が原単位法による発生負荷量と一致するよう繰り返し計算により表-5に示すように設定した。

(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。貯留定数は、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。まず、反応は1次反応とすると、物質フラックスの

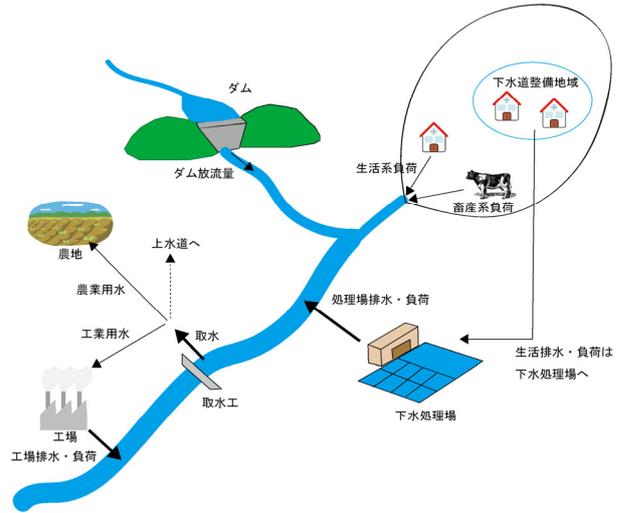


図-7 人工系モデルのイメージ図



図-8 ダム、取水工位置図

連続条件より次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t}(CA_s) + \frac{\partial}{\partial x}(CuA_s) = \frac{\partial}{\partial x}\left(A_s D \frac{\partial C}{\partial x}\right) - A_s k C \quad (2)$$

ここに、 A_s ：河道断面面積 (m²)、 u ：断面平均流速 (m/s)、 C ：物質濃度 (g/m³)、 D ：拡散係数、 k ：浄化係数である。拡散項 (右辺第1項) を無視し、流量の連続式を用いて整理すると、式(2)は以下ようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = -kC \quad (3)$$

(3) 人工系モデル

人工系モデルでは、ダムの放流や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-7に示す。

a) ダムによる流量変化

矢作ダム、羽布ダムの2ダムについて、放流量のモデ

表-6 生活系排出負荷量 (g/人/day)

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

表-7 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	2.2	26.4	1.85	15
上矢作浄化センター	74	14.7	4.4	1.7	2
八帖処理場	20,431	11	2.2	0.39	1
豊田終末処理場	10,297	10	11.4	0.62	9
鞍ヶ池浄化センター	335	4.5	12.9	0.9	5
矢作川浄化センター	132,673	6.2	5.8	0.6	1



図-9 下水処理場位置図

ル化を行う。図-8にモデル化を行ったダム の位置を示す。流入量と放流量の実測値から両者の関係を定式化することにより、流入量から放流量を算出する。1950年については、上記2ダムは完成していないため、ダムによる流量変化はない。

b) 取水工による流量変化

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 (図-8)。取水量は、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。1950年については、明治用水頭首工、越戸ダム (枝下用水) について考慮し、取水量は2004年の半分を仮定した。

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、下水処理場、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、下水処理場以外について処理形態別1人当たりの排出負荷³⁾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-6に示す。

処理形態が下水処理場に該当する場合は、生活排水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。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。処理場の位置および下水道処理区域を図-9に示す。また、各処理場からの排水量、負荷量について表-7に示す。1950年については、処理場は完成していないため、処理場からの排水は考慮しない。

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 (表-8) により排出負荷を求め、河道へ流入させる。

表-8 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

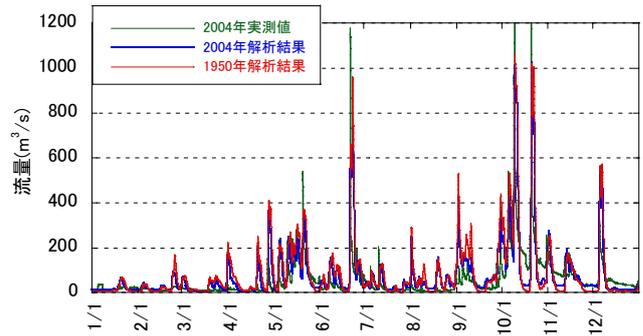


図-10 米津観測所における流量ハイドログラフ

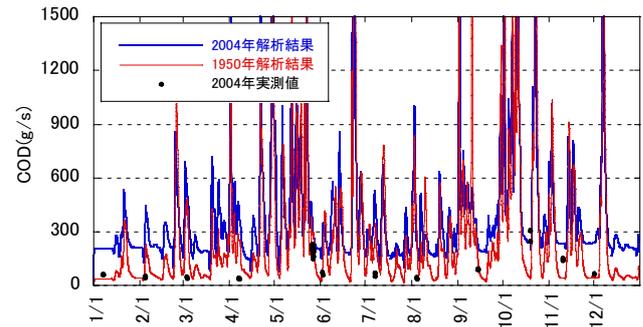


図-11 米津観測所におけるCODハイドログラフ

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。

(4) 解析結果

a) 実測値との比較

図-10に米津観測所 (図-1参照) における2004年の流

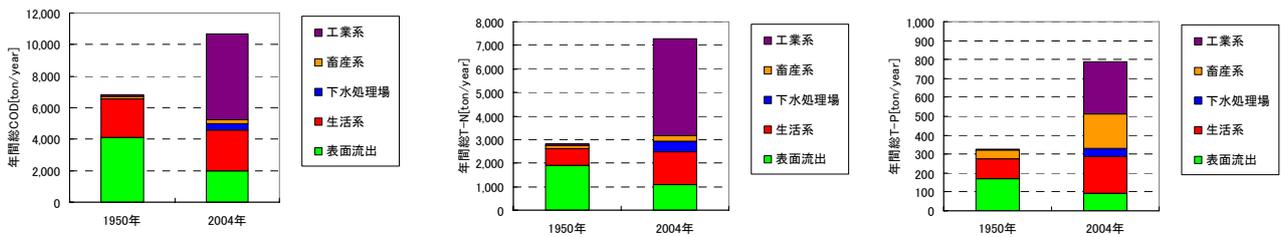


図-12 矢作川流域から流出する排出負荷量

量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は、解析結果の方が小さくなっている。これは、陸域の入力雨量として最寄りの観測所の雨量を与えており、雨量データの詳細な空間分布を考慮しておらず、局所的な豪雨を反映できていないためと考えられる。

図-11に米津観測所における2004年のCODの解析結果と実測値との比較を示す。解析結果は、実測値よりも過大となっており、特に、洪水時には、著しく増加していることが分かる。洪水時の実測値が乏しいため、比較は困難であるが、陸域における物質流出の基礎式 (1) のパラメータ設定や河道における物質流動の基礎式 (3) について、さらなる検討が必要である。

b) 1950年と2004年との比較

図-10に、1950年と2004年の流量ハイドログラフの解析結果を示す。矢作川流域では、土地利用の変化は小さいため、1950年と2004年で大きな違いは見られず、流量については、土地利用の変化は大きく影響しないことが分かる。また、2004年について、洪水時のピークが1950年と比べ若干小さくなっている。これは、矢作ダムの洪水調節の影響であると考えられる。

図-11に、1950年と2004年のCODの比較を示す。1950年は、2004年に比べ、平水時の負荷量が少ないことが分かる。これは、生活系や畜産系などの人工系の負荷流出が少ないためである。しかしながら、洪水時には、2004年と同程度の負荷が流出していることが分かる。

図-12に、矢作川流域から流出する年間の負荷量 (COD, T-N, T-P) を示す。1950年と2004年を比べると、COD, T-N, T-Pともに総流出量は2004年の方が多く、特に工業系負荷の増加が著しい。一方、表面流出による負荷量は若干減少している。また、T-N, T-Pについては、生活系と畜産系の排出負荷が増加していることが分かる。

4. おわりに

本研究では、矢作川流域を対象に、1950年と2004年について、土地利用や人口についてデータを整理した。矢作川流域では、下流域で市街化が進み、特に、水田の市街化が顕著であった。また、市街化に伴い、人口も倍増

している。下水処理場の整備が進み、およそ人口の半数をカバーしている。

1950年と2004年について、水・物質の流出解析を行い、流出量の変化について考察した。流出解析では、雨水の流出とともに、ダムや取水工による流量変化や人工系の負荷流出についても考慮した。その結果、矢作川流域では、土地利用の変化が小さいため、流量は大きく変化しないことが分かった。一方、負荷量については、生活系や畜産系、工業系の排出負荷、特に工業系の負荷の増大の影響が非常に大きい。今後は、モデルの精度向上のため、物質の流出過程についてさらなる検討が必要である。

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.
- 2) 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, pp.7-12, 2009.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 土木学会: 水理公式集[平成11年版], pp.41, 丸善株, 1999.
- 7) 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.
- 8) 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.

(2009. 9. 30受付)