

比率法を用いた綾川流域の負荷量解析と負荷量の空間分布を考慮した河川水質シミュレーション

LOAD ANALYSIS USING A RATIO METHOD AND WATER POLLUTION SIMULATION USING DISTRIBUTED LOADS IN AYAGAWA RIVER BASIN

石塚正秀¹・溝口大介²
Masahide ISHIZUKA and Daisuke MIZOGUCHI

¹正会員 博(工) 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町2217番20)

²学生会員 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 高松市林町2217番20)

A ratio method for load analysis was proposed. This method calculates loads using the data those are opened to the public. The result showed that the most of COD load came from household, TN did from paddy fields and TP from livestock farming in Ayagawa river basin. The estimated loads were plotted on the grid and used for a water pollution simulation. The model predicted well COD and TN concentrations in the middle area of the basin, namely their loads increase mainly caused the water pollution in the Ayagawa river.

Key Words: Load analysis, COD, TN, TP, River water pollution simulation, Ayagawa river

1. はじめに

香川県全域の河川のBOD濃度の長期変化から、約8割の河川で河川水質が30年前と比較して改善していることがわかった¹⁾。しかし、環境基準達成率では依然として全国平均よりも低い値で推移しており（全国第43位）、達成率を向上させるためには、さらなる水質改善の努力が必要である。達成率が低い原因の一つとして、下水道普及率の低さがあげられる（全国第41位：2002年度末時点）²⁾。しかし、水質対策に講じる予算と時間は限りがあり、より効果的な対策を進めるためには、汚染源の特定やその影響度を明らかにする必要がある。

一方、瀬戸内海沿岸域では、総量規制が行われており、河川からの負荷削減が進められている。環境省では、瀬戸内海などの閉鎖性水域におけるCOD、T-N、T-Pの負荷量推定を実施しており、府県単位の詳細な負荷量が表示されている³⁾。一般に、すべての負荷発生源に対する流出量と濃度の実測は困難であることから、負荷量の推定には、平均濃度を用いたり、原単位法が適用されている。環境省が行っている負荷量解析でも同様である。また、環境省の解析結果は、海域への負荷量を考えており、市町村別の社会統計データや養殖などの直接的な負荷量を推定している。しかし、河川の水質を考える場合には、流域単位の負荷量データが必要であるため、この結果をそのまま使用できない。また、自治体単位の統計データ

では、河川流域内の負荷量の空間分布は不明である。さらに、特定事業場や未規制事業場からの個別の排水量、排水水質、住所などは、一般に公開されておらず、実測やデータ収集も困難である。

そこで、本研究では、河川水質の改善に向けた対策手法の提案を目的として、公開されているデータをもとにした比率法を提案し、流域からの汚濁源からの負荷量解析を行う。さらに、負荷発生源別の空間分布情報を作成し、負荷量の空間分布を考慮した河川水質シミュレーションを行い、本手法の妥当性を検討する。対象河川は、流域水環境保全協議会⁴⁾が設置され、流域内データが整理されている香川県の二級河川の綾川とした。綾川では下流に建設された府中ダムの定常的な水質悪化が問題となっており、これまでに様々な検討が行われている^{5) 6)}。

2. 綾川流域の概要

(1) 地理特性

綾川は綾川水系の本川であり、香川県の代表的な二級河川である（図-1）。讃岐山脈最高峰の竜王山（標高1059.9 m）の北麓付近に源を発しており、ここから北へ向かって流れ、長柄ダム上流域で西長柄川と合流し、長柄ダムを経たのちダム直下において、田万川と合流する。その後、流路を北西に変え、堂谷川、今滝川、および富川などの支川と合流し、府中ダム（有効貯水用量800万



図-1 綾川流域

m³)に流入する。そして、坂出市街東部を流れ、坂出市林田町と坂出市江尻町の境界から瀬戸内海に注ぐ。綾川流域は香川県の中西部に位置する綾川町（旧綾上町、旧綾南町）から、その北に位置する坂出市にかけて1市1町内で形成される。河口まで含めた綾川の流路延長は38.213 km、流域面積は137.5 km²となっている。なお、本研究では対象流域を上中流域として、府中ダムまでの綾川の水質および負荷量を議論することとする。

(2) 社会特性

綾川流域の流域生活排水処理人口の割合は流域全体で2割程度であり、全国平均や香川県と比較しても低い（表-1）。また、綾川流域内の事業場は香川県全体の約3%と非常に少なく、そのうちの約8割は排水量最大50m³/日未満の小規模事業場が占めている（表-2）。

綾川流域の面積は香川県全体の約6.4%を占めている（表-3）。土地利用の特徴としては、森林が47%と、全体の約半分を占めており（表-3）、上流域（旧綾上町）で非常に多い。つぎに田畑が18%と多く、中流域（旧綾南町）から増え始める。また、家畜の頭数では、豚が香川県全体の約35%を占めており（表-3）、割合が非常に高い。

(3) 水質特性

生活排水処理の遅れ等により、上中流域の河川水が流入する府中ダムでは水質の悪化が問題視されてきた⁵⁾。そこで、香川県および綾川町では、綾川流域を対象とした水質調査を長期間行っている⁷⁾。香川県では毎月、綾川町では年に4回実施している。また、本研究においても水質調査を実施しており、2007年度は4地点（水ヶ本、綾上橋、滝宮、新綾川橋）、2008年度は4月、5月に計7地点（水ヶ本、新名、長柄ダム直下、綾上橋、滝宮、府中ダム直下、新綾川橋）で採水を行った。以上の調査結

表-1 流域の人口と生活排水処理状況（2002年度末）⁴⁾

市町名	流域人口 (人) (A)	流域生活排水処理人口 (人) (B)		普及率 (%) (B/A)
		下水道	合併処理	
旧綾上町	6,731	705	1,396	31
旧綾南町	14,745	1,180	1,725	20
坂出市	5,521	—	1,180	21
計	26,997	1,885	4,301	23
香川県	1,031,185	334,823	170,434	51
全国	126,588,000	82,570,000	13,038,000	76

表-2 流域内の特定事業場（2002年度末）⁴⁾

市町名	排水量			計
	通常50 m ³ /日以上	通常50 m ³ /日未満 最大50m ³ /日以上	排水量 最大50 m ³ /日未満	
旧綾上町	4	0	25	29
旧綾南町	6	3	41	50
坂出市	8	2	25	35
計	18	5	91	114
香川県	471	88	3,345	3,904

表-3 流域の土地利用と畜産（2002年度末）⁴⁾

市町名	流域面積 (ha)	流域の土地区分 (ha)			畜産 (頭数)	
		森林	田	その他	牛	豚
旧綾上町	6994	4363	907	1726	520	12300
旧綾南町	3328	735	1045	1548	630	1460
坂出市	1592	536	171	885	120	—
計	11914	5634	2121	4159	1270	13760
香川県	—	88289	27841	71468	28290	38800

果をもとに、綾川水質の特性をまとめて以下に示す。

- 1) 上流から中下流域に向かうにつれて徐々に水質は悪化している。なお、長柄ダム直下や府中ダム直下ではダムの影響を受けて、水質が変化する特徴がある。
- 2) SSやCOD、塩化物イオンは中流の綾上橋や滝宮で大きな値を示しており、中流域の水質が悪い。
- 3) 全窒素や硝酸イオンは上流で高く、全リン、リン酸態リン、有機態リンは中流の滝宮や綾上橋で高い濃度を示している。
- 4) 今滝川や堂谷川など中流域の支川の水質が特に悪い。

3. 負荷量解析

(1) 解析条件

流域内の個別データが存在する合併処理浄化槽、畜産、土地からの負荷量は原単位法⁸⁾を用い、個別データの存在しない全生活系、産業系1・2・3からの負荷量は比率法を用いる。なお、廃棄物最終処分地からの負荷量は全体からの差により求める。

(2) 負荷量の算定方法

a) 生活系1（全生活系）

綾川流域の下水道が普及していない人口⁴⁾と、香川県の下水道が普及していない人口⁴⁾との比に、香川県全体の生活系負荷量³⁾を乗じて綾川流域の生活系負荷量C_{LA}を算定する（式（1））。

$$C_{LA} = \frac{P_A}{P_K} \times C_{LK} \quad (1)$$

ここで、 C_{LA} ：綾川流域の生活系負荷量（kg/日）、 P_A ：綾川流域の人口から流域の下水道処理人口を引いた人口（人）、 P_K ：香川県の人口から県内の下水道処理人口を引いた人口（人）、 C_{LK} ：香川県の生活系負荷量（kg/日）である。

b) 生活系2（合併処理浄化槽）

合併処理浄化槽が整備されている地域の人数がわかっているため⁴⁾、生活系全体の中の内訳として、合併処理浄化槽からの負荷量 C_{LAg} を、環境省が示した原単位と除去率を用いて算定する³⁾（式（2））。

$$C_{LAg} = G_L \times P_A' \times \left(1 - \frac{J}{100}\right) \quad (2)$$

ここで、 C_{LAg} ：合併処理浄化槽からの負荷量（g/日）、 P_A' ：綾川流域の合併処理浄化槽の整備人口（人）、 G_L ：合併処理浄化槽の負荷量原単位（g/日/人）、 J ：除去率（%）である。なお、単独処理浄化槽と雑排水の処理人口は不明であり、全生活系からの差より両者の総計を推定した。

c) 産業系1（排水量通常50 m³/日以上）

綾川流域の事業場数⁴⁾と香川県の事業場数⁴⁾の比に、香川県の指定地域内事業場負荷量³⁾を乗じて綾川流域の指定地域内事業場の負荷量 C_{SA} を算定する（式（3））。その際、香川県の指定地域内事業場のうち、負荷量が多い石油・石炭製品と下水処理場（産業系）は綾川流域には存在しないため、算定の際に省くこととする。

$$C_{SA} = \frac{H_A}{H_K} \times C_{SK} \quad (3)$$

ここで、 C_{SA} ：綾川流域の指定地域内事業場の負荷量（kg/日）、 H_A ：綾川流域の指定地域内事業場数（戸）、 H_K ：香川県の指定地域内事業場数（戸）（ただし、 H_K には石油・石炭製品事業場と下水処理場の戸数は含まない。）、 C_{SK} ：石油・石炭製品と下水処理場を除く香川県の指定地域内事業場の負荷量（kg/日）である。

d) 産業系2（排水量50 m³/日未満）

綾川流域の小規模事業場数⁴⁾と香川県の小規模事業場数⁴⁾の比に、香川県全体の小規模事業場（通常・最大50 m³/日未満特定事業場）による負荷量³⁾を乗じて綾川流域の負荷量とする（式（4））。

$$C_{MA} = \frac{S_A}{S_K} \times C_{MK} \quad (4)$$

ここで、 C_{MA} ：綾川流域の小規模事業場の負荷量（kg/日）、 S_A ：綾川流域の小規模事業場数（戸）、 S_K ：香川県の小規模事業場数（戸）、 C_{MK} ：香川県の小規模事業場の負荷量（kg/日）である。

e) 産業系3（未規制事業場）

水質汚濁防止法による規制対象は、特定施設を設置している事業場からの排水であり、未規制事業場とは特定施設を設置していない事業場のことである。特定施設とは、Cdやその他の人の健康にかかる被害を生ずるおそれがある政令で定める物質を含む汚水や廃液を流すもの、あるいは、CODその他の水の汚濁状態を示す項目として政令で定める項目に関し、生活環境にかかる被害を生ずるおそれがある汚水や排水を流すものとされている³⁾。

綾川流域の未規制事業場数は不明のため、未規制事業場数は人口に比例すると仮定し、香川県の未規制事業場の負荷量³⁾に、綾川流域の人口を香川県の人口で除した比を乗じて、未規制事業場の負荷量 C_{NA} を算定する。

$$C_{NA} = \frac{P_A'}{P_K'} \times C_{NK} \quad (5)$$

ここで、 C_{NA} ：綾川流域の未規制事業場の負荷量（kg/日）、 P_A' ：綾川流域の人口（人）、 P_K' ：香川県の人口（人）、 C_{NK} ：香川県の未規制事業場の負荷量（kg/日）である。

f) その他系1（畜産系）

牛と豚の頭数（表-3）と香川県の原単位³⁾を用いて、畜産系負荷量 C_{CA} を算定する（式（6））。

$$C_{CA} = \sum_{i=1}^2 N_i \times G_{Ci} \times \left(1 - \frac{J_{Ci}}{100}\right) \quad (6)$$

ここで、 C_{CA} ：綾川流域の畜産系負荷量（g/日）、 i ：家畜の種類、 N_i ：家畜 i の頭数（頭）、 G_{Ci} ：家畜 i の負荷量原単位（g/頭/日）、 J_{Ci} ：家畜 i の除去率（%）である。

g) その他系2（土地系）

香川県における土地系の原単位³⁾と、国土数値情報（平成9年）にもとづく土地利用毎の面積より、土地利用による負荷量 C_T を算定する（式（7））。

$$C_T = \sum_{j=1}^4 G_{Aj} \times A_j \quad (7)$$

ここで、 C_T ：土地利用 i の負荷量（g/日）、 G_{Aj} ：土地利用 j における負荷量原単位（g/日/ha）、 A_j ：土地利用 j の面積（ha）である。

h) その他系3（廃棄物最終処分地）

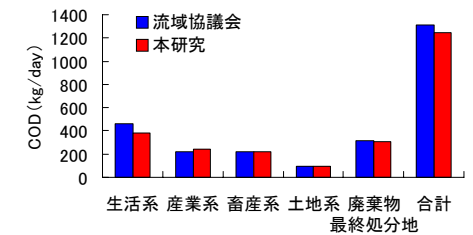
廃棄物最終処分地については、情報が公開されていないため、流域協議会により示されたその他系の負荷量 C_A ⁴⁾から、f)とg)で求めた畜産系と土地系の負荷量を差し引いた量を廃棄物最終処分地の負荷量 C_H とした。

$$C_H = C_A - (C_{CA} + C_T) \quad (8)$$

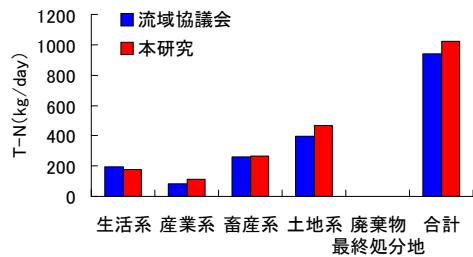
i) 総負荷量

上記a)～h)で求めた値の総計を総負荷量 T とする。

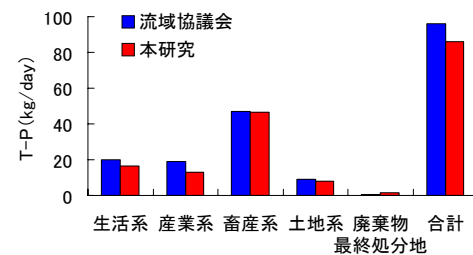
$$T = C_{LA} + C_{SA} + C_{MA} + C_{NA} + C_{CA} + C_T + C_H \quad (9)$$



(a) COD



(b) T-N



(c) T-P

図-2 流域協議会データ⁴⁾と本手法との比較

(2) 排出源別負荷量の推定結果の比較

上記の方法により求めた排出源別のCOD, T-N, T-Pの負荷量を流域協議会が示した結果⁴⁾と比較した結果を図-2に示す。なお、流域協議会の結果は図-2に示した大分類系のみが公表されている。比率法とは異なる手法で推定された流域協議会の結果と比較して、両者はよく一致しており、本研究の解析手法は妥当であるといえる。

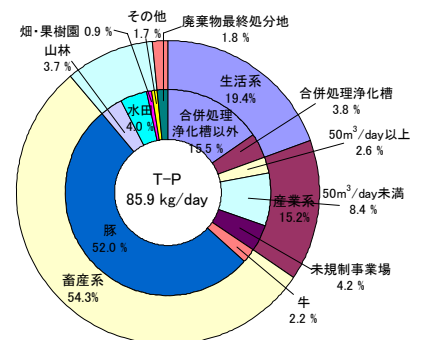
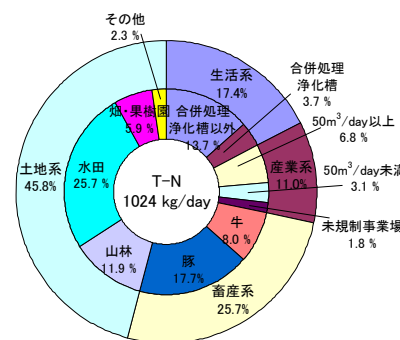
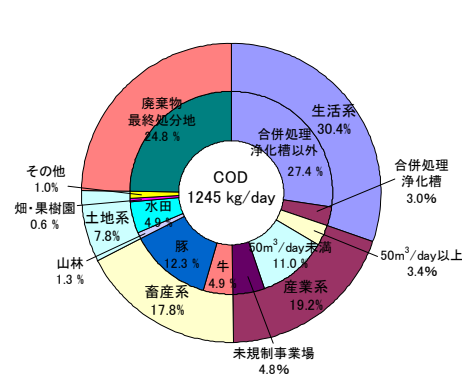


図-3 発生源別負荷量の解析結果

表-4 発生源別負荷量の解析結果

排出源		COD負荷量 (kg/日)	T-N負荷量 (kg/日)	T-P負荷量 (kg/日)	
生活系	合併処理浄化槽以外	341	140	13.4	
	合併処理浄化槽	38	38	3.3	
産業系	50 m ³ /日以上	42	63	2.2	
	50 m ³ /日未満	137	31	7.2	
	未規制事業場	60	19	3.6	
その他	畜産	牛	61	82	1.9
		豚	161	182	44.7
	土地系	山林	16	122	3.2
		水田	61	264	3.5
		畑・果樹園	8	60	0.8
		その他	12	24	0.6
	廃棄物最終処分地	309	0	1.5	
合計	1245	1024	85.9		

そこで、本研究で推定した詳細な排出源別の結果を表-4および図-3に示す。CODは合併処理浄化槽を除く生活系（単独処理浄化槽もしくは雑排水）の影響が最も大きく、T-Nは土地系の水田の影響が大きく、T-Pは畜産系の豚の影響が大きいことが明らかとなった。

(3) 排出源の空間分布

国土数値情報の3次メッシュをもとにして、約2 km×2 kmのグリッドを作成し、負荷が発生するグリッドを発生源別に色付けた空間分布図を示す（図-4）。ここで、生活系の位置は国土数値情報の土地利用データの市街地の位置とした。産業系1・2、畜産系、廃棄物最終処分地の位置は香川県より提供を受けた住所データを用いた。未規制事業場（産業系3）はデータがないため生活系と同じとした。土地系は国土数値情報を用いた。

生活系、産業系1・2、畜産系、廃棄物最終処分地は中流域を中心に分布している。土地系については、上流域では山林が広がり、中流域では水田が広がっている空間情報が得られた。

5. 水質シミュレーション

(1) 基礎方程式

物質の濃度変化は流下方向への1次元の定常変化を考慮することとする（式（10））。

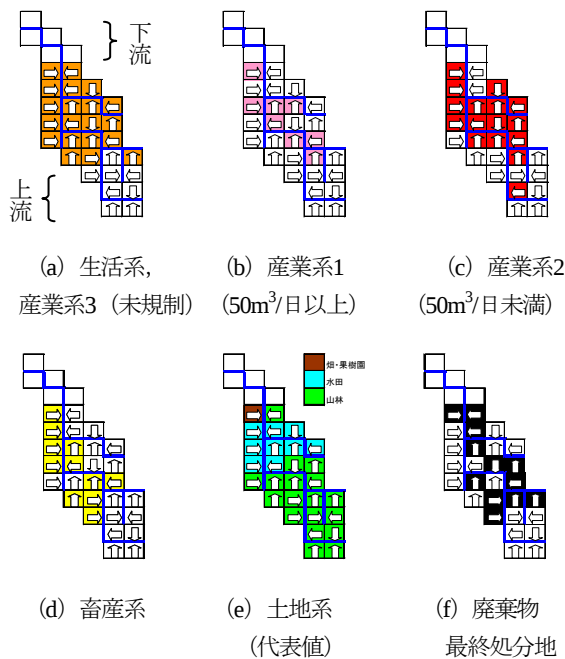


図-4 綾川流域における負荷発生地点の分布図

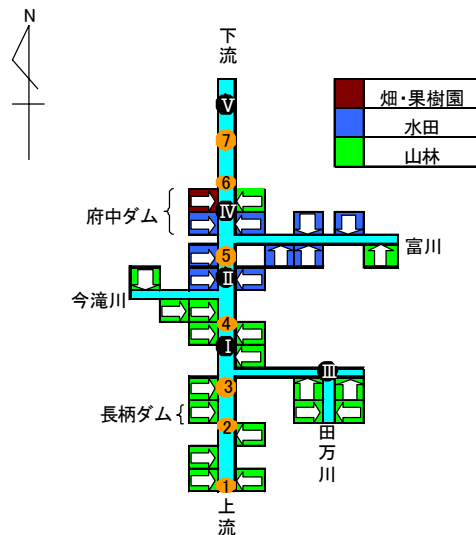


図-5 綾川流域の直線グリッド図

(①, ④, ⑤, ⑦)は2007年度の調査地点であり, 2008年度は4月と5月に新たに②, ③, ⑥の3地点を加え, 計7地点とした。また, 香川県および綾川町が調査している地点はⅠ~Ⅴである。)

$$u \frac{dC}{dx} = -k_b C - k_p C + L_c \quad (10)$$

ここで, C : 濃度 (g/m^3), x : 流下距離 (m), u : 移流速度 (m/min), k_b : 生物活動による酸素消費速度 ($1/\text{min}$), k_p : 物理・化学作用による除去速度 ($1/\text{min}$), L_c : 負荷量 ($\text{g}/\text{m}^3/\text{min}$) である。

(2) 計算格子

図-4に示した綾川流域のグリッド図(土地系)を本川

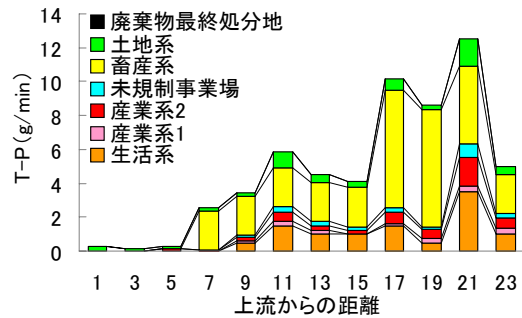
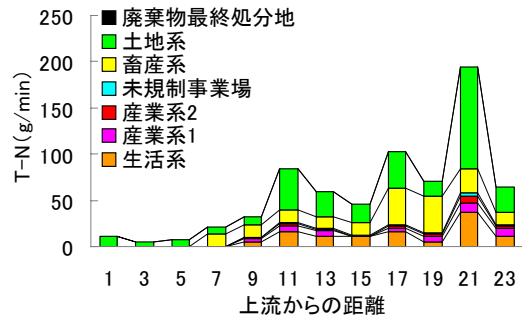
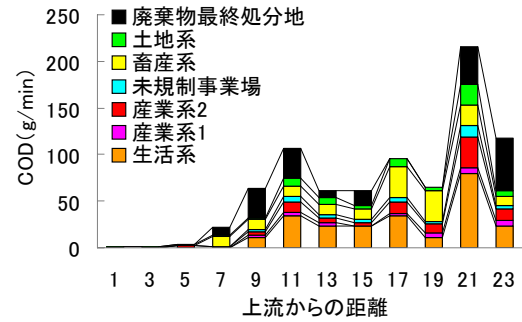


図-6 流入地点別の発生源別負荷量

が直線になるように変更した(図-5)。負荷を考慮するグリッドの大きさは約 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ であり, それが1次元方向に12個(24 km)並んでいる。支川が流入する地点では水質モデルのグリッド(格子間隔 $200 \text{ m} \times 10$ 個)に平均的に負荷量を与える。なお, 本水質モデルは長柄・田万ダムおよび府中ダムを河道として取り扱う。

(3) 発生負荷条件と計算条件

図-3と図-4で示した結果を用いて図-5の本川に流入する負荷量を発生源別に算定した結果を図-6に示す。生活系と未規制事業場は各グリッドの市街地面積を国土数値情報の土地利用データより算出し, 面積割合を重みとして算定した。同様に, 土地系も各土地利用の面積を重みとした。産業系1・2, 畜産系, 廃棄物最終処分地は各グリッド内の事業場数(香川県より提供)を考慮した。

COD, T-Pは中流域から負荷量が増加し, T-Nは上流域から土地系の負荷がある。各成分共に上流から20 kmの府中ダム流入地点において, 最も大きな負荷量が富川流域より流入している。生活系の負荷は中流域全体に効いており, また, T-Nでは土地系(水田)が10 kmから, 畜産系が16 kmより, 大きく効いており, T-Pでは畜産

表-5 係数の値

パラメータ		単位	数値
u	移流速度	m/min	30
k _b	生物活動による酸素消費速度	l/min	0.0006
k _p	物理・化学作用による酸素消費速度	l/min	0.0016
L	計算区間	m	32000
IXNUM	断面分割数	—	160
dx	格子間隔	m	200

系が6 kmより大きく影響している。

表-5にシミュレーションで使用する係数の値を示す。上流端の物質濃度は観測結果の平均値を用いた。

(4) シミュレーション結果

シミュレーション結果を観測結果と合わせて図-7に示す。観測結果と比較すると、CODとT-Nは長柄ダム周辺で再現性が悪くなっているが、中流域ではほぼ一致しており、よく再現されているといえる。一方、T-Pは中流域でシミュレーション結果がやや高い値となった。図には示していないが、支川の観測データは非常に高く、シミュレーション結果は支川と本川の中間の値を示してい

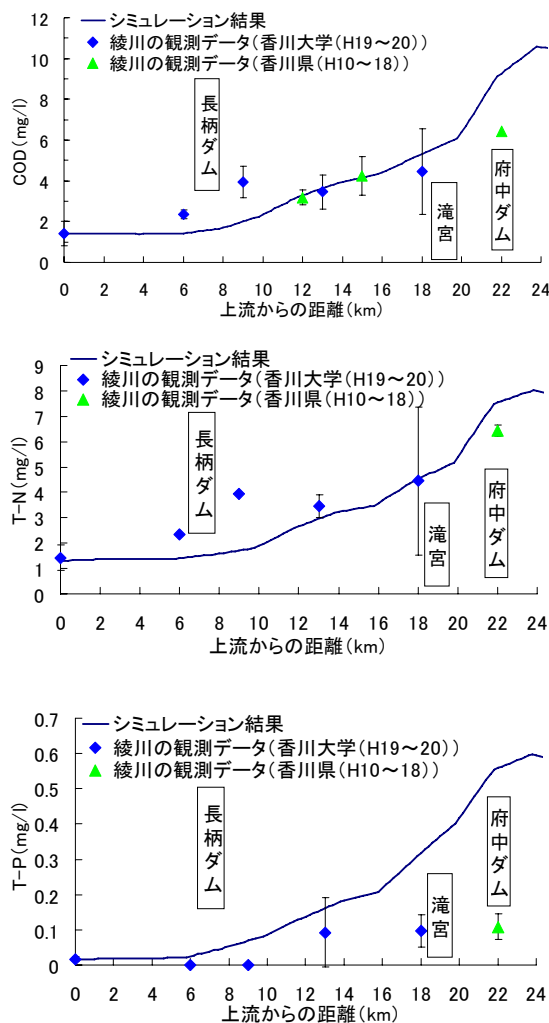


図-7 河川水質の流下方向の変化
(シミュレーションと観測との比較)

る。T-Pの負荷量としては、畜産系の影響が54%と大きく(図-3)、中流域でとくに大きい(図-6)。T-P負荷量の総量は流域協議会の結果とほぼ一致していることから(図-2)、数値モデルの高精度化、近年の畜産排水の処理方法の変化の検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、河川の水質改善に向けた対策手法の提案を目的として、負荷量解析と水質シミュレーションを行った。負荷量解析では、個別データの得られていない発生源に対して比率法を提案し、妥当な結果を得た。さらに、発生源別の負荷量の空間分布情報を作成し、河川水質に与える発生源別の特徴を明らかにした。具体的には、綾川流域の特徴として、CODに対しては生活系の負荷、T-Nには土地系の水田、T-Pには畜産系の豚の影響が最も多いことがわかった。また、負荷量の空間分布を考慮した河川水質シミュレーションを行い、CODとT-Nについて、良好な結果を得た。つまり、本研究で提案した解析手法による河川水質の再現性の高さが示された。

一方、課題も多く残されている。例えば、畜産系のT-P負荷量の算定方法の修正、水質変化の非定常性の考慮、ダムの効果、解析に使用したデータの年度の統一などがある。今後は負荷量を変化させたケーススタディを実施し、水質改善のための具体的な施策を提案していきたい。なお、負荷量解析に用いる基礎データは非公開のものも多く、各自治体と協力して、情報の公開をスムーズに進めることも必要である。

謝辞：本研究は、香川県と香川大学の連携融合事業（代表：白木渡）の補助を得ました。また、現地観測・水質分析・データ解析には香川大学卒業生の井芝瑠美様、白神晴基様の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 香川県：平成18年度水質調査結果，172p，2007.
- 2) 香川県：香川の下水道，188p，2004.
- 3) 環境省：平成17年度発生負荷量等算定調査報告書，195p，2006.
- 4) 綾川流域水環境保全推進協議会：綾川流域水環境保全行動計画，35p，2005.
- 5) 山本務，藤田淳二，多田薫，中野智：香川県公害研究センター所報，No.11，pp.29-42，1986.
- 6) 河原能久，竹内豊，野々村敦子，松尾克美：マイクロバブルによる富栄養貯水池の深水層の水質改善に関する現地試験，水工学論文集，第50巻，pp.1351-1356，2006.
- 7) 香川県森林環境部提供：水質測定計画書調査結果.
- 8) 國松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技法堂出版，266p，1989.

(2009. 9. 30受付)