原 著 [Original article]

周辺部河川からの宍道湖への汚濁負荷流入特性

菅井隆吉¹⁾・溝山 勇²⁾・管原庄吾³⁾・清家 泰³⁾

Inflow characteristics of pollutant loads from surrounding rivers into Lake Shinji.

Ryukichi SUGAI¹⁾, Isamu MIZOYAMA²⁾, Shogo SUGAHARA³⁾, Yasushi SEIKE³⁾

Abstract

In this study (1993-2003), the Loading-flow rate (LQ) equations for rivers and drainages, flowing into Lake Shinji were determined by applying the least-squares method to logarithmic regression curves based on data from loadings and flows. Our results showed that values for “b” from the equation, loading = a (flow rate)^b ($L=aQ^b$) in the Hii River, were higher under flood flow conditions than values calculated under normal flow conditions, with the exception of total inorganic nitrogen (TIN).

The percentages of pollutant loadings from the Hii River to Lake Shinji were 60, 40, 62, 31, and 36% for chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total inorganic nitrogen (TIN), total phosphorus (TP), and phosphate (PO₄-P) respectively.

Pollutant loadings of TN, TP from other rivers to Lake Shinji were higher than the Hii River, although the percentage of total amount of river water (approximately 20%) from other rivers were lower than the Hii River. As a result of a cluster analysis, indicators of water pollution were divided into five groups, revealing that the TIN/PO₄-P ratio from inflows into the west bank region of Lake Shinji (with the exception of the Hii River) were higher than those of other rivers.

The percentages of the particulate portion of phosphorus (PP) in the Hii River, under both flood flow conditions and normal flow conditions, were higher than those of COD and TN. In addition, our results revealed that the TN/TP ratio was smaller under flood flow conditions (6.0) than that under normal flow conditions (29), indicating that relative phosphorus loadings were increased under flood flow conditions.

Keywords: Lake Shinji, pollutant load, LQ equation, TN/TP ratio

摘 要

宍道湖周辺の24河川及び5小水路における、流量と水質負荷量の関係式として、最小二乗法によりべ

¹⁾ 公益財団法人 島根県環境保健公社 〒690-0012 島根県松江市古志原1-4-6 Shimane Environment & Health Public Corporation, 1-4-6 Koshibara, matsue, shimane 690-0012, japan

²⁾ 国土交通省 中国地方整備局 三次河川国道事務所 〒728-0011 広島県三次市十日市西6丁目2番1号 Miyoshi Office of River and National Highway, Chugoku Regional Development Bureau, Ministry of land, Infrastructure, Transport and Tourism, 6-2-1 toukaichinishi, miyoshi, Hiroshima 728-0011, japan

³⁾ 島根大学大学院総合理工学研究科 〒693-0023 島根県松江市西川津町1060 Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

き乗形の $L=aQ^b$ による回帰式を求めたが、斐伊川の $L=aQ^b$ 式において、 b の値（傾き）が平水時に比べて出水時においてTIN以外は、明らかに大きくなることが分かった。

斐伊川による宍道湖への流入水量は全体の78%を占めたが、COD、TN、TIN、TP及び $PO_4\text{-P}$ の負荷割合はそれぞれ、全体の60%、40%、62%、31%、36%であった。このように、斐伊川以外の河川からの総水量は約20%と小さいにもかかわらず、それらのTN及びTP負荷は高い割合を占めることが明らかになった。宍道湖への流入河川32地区の水質7項目の平均値に対して、クラスター分析を行ったところ、流入水の水質は5つのクラスターに分類されたが、斐伊川を除く宍道湖西岸域地点からの流入水のTIN / $PO_4\text{-P}$ 比は、他の河川に比べ特異的に高いことが分かった。

また斐伊川からの流入負荷においてリンは、COD、窒素に比べ、平水時、出水時ともに懸濁態の比率が高いことが分かったが、斐伊川の流入負荷におけるTN/TP比は、平水時の29が出水時には6.0に減少し、リンの負荷は相対的に出水時において高まることが明らかになった。

キーワード：宍道湖、汚濁負荷、LQ式、TN/TP比

（2015年7月3日受付：2015年10月20日受理）

はじめに

湖沼の水質保全のための各種対策（島根県，2010）は進められてはいるものの、特に宍道湖のような閉鎖的湖沼においては、湖内部からの負荷（神谷ら，1996，2001；菅井ら，2012，2015）が湖内の物質循環と絡まり、より複雑な水質環境を形成するため、湖水質は必ずしも改善されている状況ではない。しかしこれも、もとはといえば周辺部からの流入負荷が湖内において時間差を持って現れたものと考えることができ、結局は流入負荷が主因となる。湖沼は長期的には、宿命的に、周辺からの汚濁物質を溜める場として機能してしまうことになる。したがって、湖沼水質を改善していくためには、基本的には周辺からの流入負荷を可能な限り削減していくことが重要である。

流入負荷は、生活排水、事業所等からの排出による点源負荷と山林、農地、市街地からの面源負荷の大きく二つで構成される。点源負荷においては、法律に基づく排出基準値の設定による排水処理、また広域的な下水道整備も進められているが、一方の面源からの負荷の詳細は宍道湖流域においても不明な点が多く、その対策は今後の課題となっている。

河川からの汚濁流出負荷量に関しては、詳細な研究（山口・吉川，1978，1980；海老瀬，1981）がなされているが、宍道湖のような閉鎖的水域における水環境の推移を推し量る上で、流入負荷量の精度の高い算定は欠かせない基本的な事項である。しかしながら湖沼流域は広く、汚濁の流入実態を明らかにしていくことは多大な時間と

労力を必要とするもので、斐伊川におけるIshitobi et al., (1988), Kamiya et al., (2008), 宮廻ら (2014) の研究はあるものの、宍道湖全域にわたる流入負荷の実態を長期的に調査した報告は皆無である。

本研究においては、「①周辺部の各流入河川・水路から宍道湖への流入負荷量を推算するための、流量と負荷量の関係式（LQ式）を求めること」と、「②宍道湖への汚濁物質の流入負荷特性を明らかにすること」の二つを目的として、宍道湖に流入する斐伊川本川（以下斐伊川とする）をはじめとする流入河川、水路及び宍道湖西岸域における排水樋門において、水質分析のための採水と、同時に流量観測を実施した。その結果、宍道湖への流入水量の約80%を占める斐伊川の負荷割合は、COD、TN及びTPでそれぞれ61%、40%、31%となり、TN、TPにおいては斐伊川以外の小河川からの負荷が案外大きいことが明らかとなるなどの成果を得たので報告する。

宍道湖流域の概況

宍道湖は、東側の中海と大橋川で繋がる汽水湖であるが、一級河川斐伊川として管理されている。斐伊川は、宍道湖の西岸に流入するが、その源を島根県と広島県との県境、船通山（標高1,143m）に発し、途中多くの支川を合わせながら北流し、さらに下流に広がる出雲平野を東に貫流し、宍道湖、大橋川、中海、境水道を経て日本海に注ぐ幹川流路延長153km、流域面積2,540km²の島根県東部で最も大きい河川である。斐伊川流域は、島根、鳥取両県にまたがり、松江市、出雲市、米子市他の7市2町からなり、土地利用は山林等が約89%、水田

Fig. 1. The locations of observation sites. Open circles (No.) indicate waterways and gutter gates.

図1. 観測地点(No.)は水路及び樋門を示す。

や畑地等の農地が約9%, 宅地等その他が約2% (国土交通省出雲河川事務所ホームページ; <http://www.cgr.mlit.go.jp/izumokasen>▷事業概要▷斐伊川流域の概要) となっている。

調査方法

平水時調査

田渕・黒田(1993)は, 流入負荷量は流量によって大きく影響されるので流入負荷量を精度よく算出するためには, かなりの測定回数が必要で, ひとつの集水域の平均的な流入負荷量を算出するためには, ある年の測定だけでは不十分である, と指摘している。本研究では Fig.1 に示す, 宍道湖西岸域の斐伊川を含む5河川と, 3排水樋門, 宍道湖南岸の9河川と, 3小水路, 及び北岸の10河川と, 2水路において, 各1地点の計32地点において1996年から2003年にかけ, 概ね年間3回のピッチで, 一日1回の採水(雨天時を含む)と, 同時に流量観測を実施した。排水樋門においては1994年, 平田船川においては1995年から実施した。また斐伊川については, 月一回の定期水質観測データ(1996-2003年)を使用した。

出水時調査

宍道湖流域における最大河川である斐伊川は当然, 排出負荷量も最大になるものと予想される。したがって斐

伊川においては降雨時(高島ら, 1995), 特に出水時の流出負荷も的確にとらえる必要がある。斐伊川においては極力広い流量範囲での観測を念頭に, 1993年から2001年にかけて, 台風等の出水時に, 出水の全波形を捉えたものではないが合計20回の一週複数回の調査を実施した。なお採水時の流量については大津流量観測所の流量値を使用した。

水文観測

1996年から2001年にかけて, 平水時調査では各河川, 水路において, 事前に調査位置の横断測量(建設省, 1986)を行い, 調査当日には採水と同時に水位観測と電磁流速計(KENEK社製VM2001)による流速の観測を行った。なお, 水深の浅い河川, 水路における流速測点は, 全水深の6割の位置とした。斐伊川における採水時の流量については, 月1回の定期水質観測時における大津流量観測所の流量値を(平水時流量として)使用した。

また, 排水機場の排水量については各排水機場における排水ポンプの性能に基づき, 新三分市排水樋門 $0.87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 新右岸排水樋門 $0.58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 荘原新田排水樋門 $0.24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とした。

水質分析

CODは過マンガン酸カリウム酸化法による分析を

行った。TNはアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム、TPはペルオキシ二硫酸カリウムを加えオートクレーブ中、1.2気圧30分で分解無機化後、上澄み液についてそれぞれ自動分析装置（BRAN+LUEBBE 社、TRAACS-800）による分析を行った。また、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-Pについては、試料をガラス繊維ろ紙（Whatman GF/C、粒子保持能1.2 μm）でろ過した後、自動分析装置（BRAN+LUEBBE 社、TRAACS-800）による分析を行った。なおNH₄-Nはインドフェノール青法、NO₃-Nは銅-カドミウムカラムで還元後ナフチルエチレンジアミン法、NO₂-Nはナフチルエチレンジアミン法、PO₄-Pはモリブデン青法による。無機態窒素についてはNO₃-N、NO₂-N、NH₄-Nの和を全無機態窒素（TIN）として求めた。

調査結果および考察

流入水の流量

Table1に各河川の流域面積（建設省、1979）と流量観測結果を示すが、流域面積は斐伊川が920 km²と最も大きく、ついで平田船川が49.1 km²、新建川27.1 km²、忌部川19.6 km²と続く。

宍道湖への流入水量は、最大流域面積を持つ斐伊川（34.5 m³ s⁻¹）が最も大きく、流入水の78%と、全流入水の約8割を占めている。斐伊川以外では、流域面積の大きい河川が多い宍道湖西岸域の河川において水量が大きい傾向にあるが、流域面積で第2位の平田船川が3.09 m³ s⁻¹、五右衛門川、新建川、論田川が各々0.968、0.735、0.713 m³ s⁻¹でそれに続いている。論田川の流域面積はさほど

Table 1. The basins and forested areas of the observation sites and study period (1993-2003).

表1. 調査河川の流域面積及び山地面積と調査期間。

No	Sampling sites	Basin area (Km ²)	Forest area (%)	Flow rate (mean : m ³ s ⁻¹)	Observation terms
1	Hii-River	920	93.1	34.5 ^{*1)} 443 ^{*2)}	1996/01-2003/12 1993/06-2001/06
West region	2 Hiratahunagawa-river	49.1	63.1	3.09	1995/05-2003/01
	3 Ronden-river	5.0	-	0.130	1997/06-2003/01
	4 Goemon-river	15.8	-	0.968	1994/05-2003/01
	5 Shintate-river	27.9	70.0	0.735	1997/06-2003/01
	⑥ Shinsanbuichi-D. P. S.	-	-	0.870	1994/05-2003/01
	⑦ Shinugan-D. P. S.	-	-	0.580	1994/05-2003/01
	⑧ Shobarashinden-D. P. S.	-	-	0.240	1994/05-2003/01
South region	9 Sasahu-river	10.2	79.7	0.326	1996/09-2003/01
	⑩ Shinji-cho-drain	-	-	0.038	1996/12-2003/01
	11 Dodho-river	5.9	81.2	0.132	1996/09-2003/01
	⑫ Nishikimachi-drain	-	-	0.058	1996/09-2003/01
	13 Kimachi-river	17.3	89.5	0.437	1996/09-2003/01
	14 Higasikimachi-river	-	-	0.029	1996/09-2003/01
	15 Matukure-river	-	-	0.057	1996/09-2003/01
	16 Hongo-river	3.8	78.7	0.092	1996/09-2003/01
	17 Tamayu-river	13.3	88.7	0.273	1996/09-2003/01
	⑬ Hujina-drain	-	-	0.040	1996/09-2003/01
	19 Inbe-river	19.6	92.7	0.364	1996/09-2003/01
	20 Sannkyo-river	4.0	47.0	0.231	1996/09-2003/01
North region	21 Kososhi-river	9.5	65.0	0.183	1996/09-2003/01
	22 Higashinagae-river	2.2	54.1	0.052	1997/06-2003/01
	23 Nishinagae-river	3.1	80.3	0.097	1996/09-2003/01
	24 Aika-river	4.9	89.3	0.168	1996/09-2003/01
	25 Okamoto-river	5.6	99.8	0.055	1996/09-2003/01
	⑭ Ohgaki-cho-drain	-	-	0.043	1996/09-2003/01
	27 Ohno-river	4.0	84.9	0.093	1996/09-2003/01
	28 Kusano-river	4.1	73.0	0.129	1996/09-2003/01
	29 Ino-river	8.1	68.6	0.109	1996/09-2003/01
	⑮ Kozakae-cho-drain	-	-	0.035	1996/09-2003/01
	31 Kozakae-river	5.0	73.8	0.144	1996/09-2003/01
	32 Sakai-river	7.2	92.8	0.175	1996/09-2003/01

*1) : Normal flow conditions; *2) Flood flow conditions

大きくないが、流域の田畑の灌漑用としての、斐伊川からの導水の影響を受けているものと推察される。

流入水の流量及び水質

Fig.2に各地点における流量、COD、TN、TIN、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ のそれぞれ最大値、最小値、平均値を示す。

1) COD

斐伊川のCOD値 (2.3 mg L^{-1}) は最も低く、斐伊川以外、矢道湖における環境基準値 3.0 mg L^{-1} を下回る地点はなかった (Fig.2b)。他地点 (31地点) では、基準値の1.1～3.4倍の範囲にあったが、7地点が基準値の2倍を超える濃度であった。最大値は、矢道湖北岸 (St. 22～26) において高い傾向が見られたが、南岸では流域のほとんどが市街地の山居川 (St. 20) が、平均値 (10.3 mg L^{-1})、最大値 (33.6 mg L^{-1}) とともに高かった。矢道湖西岸域の河川は、山陰最大の穀倉地帯で田畑や斐伊町また平田町の住宅地を背景とするが、西岸域河川のCOD平均値は 4.8 mg L^{-1} と斐伊川以外の全平均値 (5.5 mg L^{-1}) よりやや低い値であった。

2) 窒素

Fig.2cに示すように、TN濃度も山居川が平均値 (5.03 mg L^{-1})、最大値 (12.2 mg L^{-1}) とともに最も高く、市街地からの負荷を示している。また、最大値は矢道湖西岸の排水機場地点 (Sts. 6, 7, 8) と北岸の岡本川 (St. 25) において高い傾向が見られた。斐伊川の平均TN濃度は32河川中低い順で9位であったが、斐伊川の 0.66 mg L^{-1} を含め32点全てが矢道湖におけるTNの環境基準値 0.4 mg L^{-1} を超えており、そのうちの17地点が基準値の2倍を超える濃度であった。また斐伊川の平均TIN濃度は32河川中、同11位であるが、斐伊川の 0.41 mg L^{-1} を含め、32地点中22地点が、矢道湖における基準値 0.4 mg L^{-1} を超える濃度であった (Fig. 2d)。またそのうちの10地点は、基準値の1.5倍を超える濃度であるが、矢道湖西岸域の7地点はすべてが基準値を超え、かつ基準値の1.6～3.9倍と南岸、北岸地点に比べ高い傾向を示した。田淵ら (1979) や近藤ら (1993) は灌漑初期における窒素の流出や田植え期のリンの排出、また武田ら (1991) も灌漑期の排水、浸透水において窒素・リン濃度が高くなることを指摘しているが、矢道湖西岸に広がる水田地帯

Fig. 2. Water quality (pollutants) indicators of inflow from rivers, waterways, and gutter gates.

図2. 流入河川及び水路、樋門の水質。

Fig. 3. Constitution of inorganic nitrogen in inflow.

図3. 流入水の無機態窒素構成。

からも同様な窒素の流出が考えられる。大槻（2000）や和田・三浦（1996）も指摘するように、集水域の市街地、農地、山地からのノンポイント汚染源負荷の発生・流出抑制が必要である。またTIN濃度も山居川（St. 20）が最も高いが、TINのうち $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の占める割合が61%と、西岸域の7地点を除く全域平均値の23%に比べて高い（Fig.3）。また山居川同様、西岸域の三つの排水樋門（Sts. 6, 7, 8）における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度も3地点平均で63%と、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に比べ高いことが分かったが、山居川のような市街地や、宍道湖西岸域などの田畑や住宅地を背景とする河川において、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の比率が高い傾向がうかがえる。

3) リン

Fig.2eに示すように、TP濃度もTN同様、山居川は平均値が 0.560 mg L^{-1} 、最大値は 2.13 mg L^{-1} と、ともに最も高い値であった。またTP濃度の最大値はCOD同様、宍道湖北岸（St. 21～26）において高い傾向が見られた。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度（Fig.2f）も山居川は平均値が 0.239 mg L^{-1} 、最大値は 1.05 mg L^{-1} と、ともに高い値でTN同様に市街地からの負荷が大きいことを示している。

斐伊川のTP濃度（ 0.023 mg L^{-1} ）はCOD同様、最も低い。しかしながら斐伊川以外全てが宍道湖におけるTPの環境基準値 0.03 mg L^{-1} を超えており、そのうちの28地点が基準値の2倍を超えていることが分かった。一方、斐伊川の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度（ 0.023 mg L^{-1} ）もTP同様、最も低い、他地点の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、TPの環境基準値 0.03 mg L^{-1} を超える地点は32地点中7地点で、TINに比べると基準値を超える地点数は少なかった。またTIN濃度の高かった宍

道湖西岸域地点においても、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は宍道湖におけるTPの環境基準値の0.23～0.65倍と、TIN濃度に比べるとその濃度は比較的低いことが分かった。

流入水水質の流域特性

宍道湖への流入河川（水路・樋門を含む）、全32地点の水質7項目（COD, TN, TIN, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$, TP及び $\text{PO}_4\text{-P}$ ）を対象に、各平均値に対して、クラスター分析（ウォード法による）を行ったところ、流入水の水質は5つのクラスターに分類された（Fig.4）。以下にその5つに分類されたクラスターの水質特性について述べる。

クラスター1) COD値や窒素、リン濃度で評価される汚濁度が、相対的に低い西岸4河川、南岸6河川、北岸西寄りの4河川1水路で構成される。

クラスター2) 南岸、北岸それぞれ1つの水路で構成されているが、COD値や窒素、リン濃度で評価される汚濁度はかなり悪く、それらの値は上位2番目に位置する。

クラスター3) COD値や窒素、リン濃度で評価される汚濁度が中間に位置する南岸2河川2水路、北岸6河川で構成される。

クラスター4) COD値やリン濃度はさほど高くないが、特にTN濃度や、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が特異的に高い宍道湖西岸に位置する1つの河川と3つの排水樋門で構成される。

クラスター5) 宍道湖への流入水のなかで、COD値や窒素、リン濃度で評価される汚濁度が極めて高い水質として分類され、市街地に位置する北岸の山居川だけが帰

周辺部河川からの矢道湖への汚濁負荷流入特性

Fig. 4. Hierarchical dendrogram of clustering of the water quality (pollutants) indicators (COD, TN, TIN, NH₄-N, NO₂-N+NO₃-N, TP, and PO₄-P) measured in this study.

図4. 流入水質のクラスター分類.

Table 2. Water quality (pollutants) and flow rate of the Hii River.

表2. 斐伊川における流量と水質.

Item	Flow rate m ³ s ⁻¹	COD	PCOD	DCOD	TN	DTN	TIN	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	TP	DTP	PO ₄ -P
mg L ⁻¹													
Flood-flow	Max.	1560	108	105	6.3	4.49	1.28	0.90	0.86	0.023	0.18	0.711	0.058
	Min.	81	3.9	0.2	2.0	0.38	0.43	0.21	0.20	0.001	0.01	0.056	0.015
	Ave.	443	15.4	11.5	3.9	1.28	0.69	0.51	0.46	0.007	0.04	0.214	0.032
Normal-flow	Max.	151	4.0	3.1	3.5	1.23	1.15	0.64	0.59	0.014	0.14	0.050	0.024
	Min.	5.1	1.3	0.1	1.2	0.35	0.32	0.18	0.16	0.001	0.01	0.011	0.000
	Ave.	34.5	2.3	0.5	1.9	0.66	0.60	0.41	0.38	0.004	0.03	0.023	0.011
%													
Mean Ratio (Ave.)		PCOD COD	DTN TN	PN TN	TIN TN	TIN DTN	NO ₃ -N DTN	NO ₃ -N TIN	NH ₄ -N TIN	PO ₄ -P TP	PP TP	TN TP	TIN PO ₄ -P
Flood-flow		75	54	46	62	74	67	90	7.8	9.3	85	6.0	26
Normal-flow		17	91	9.1	62	68	63	93	7.3	26	50	29	68

属した。

以上のように、COD値やTN濃度、TP濃度等で示される総合的な汚濁の程度の差が分類に反映された。最も汚濁の進んだ河川は南岸の1河川で、次に続く汚濁度がかなり悪い水路が南北それぞれ一地点、そして汚濁度が中程度の河川と汚濁度が相対的に低い河川は、南北ほぼ同数であることが分かった。ただし西岸域においては、特にTN濃度や $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高い1つの河川と、3つの排水樋門がひとつのクラスターとして分類された。

斐伊川における出水時の水質特性

Table 2に、出水時調査及び平水時調査それぞれにおける流量及び水質濃度の最大値、最小値、平均値を示す。流量は平水時の平均値 $34.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ に対し、出水時の流量平均値は $443 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ で、平水時の約13倍の規模となっているが、出水時においては、流量の増加に伴う濁質濃度の上昇により各水質項目ともに、その濃度は大きく上昇している。CODにおける懸濁態分(PCOD)の割合は、平水時の17%が出水時には75%に、懸濁態窒素(PN)は9%が46%に、また懸濁態リン(PP)は50%が85%へと、出水時には懸濁態分がそれぞれ大きく増加するが、出水時においてリンは、懸濁態分の割合が窒素に比べて大きくなっていた。このような出水時における懸濁態分の増加については、他水域において森田ら(1985)や國松・須戸(1993)も報告しており、また、懸濁態分の割合の程度は窒素に比べリンにおいて顕著であることを和田・藤井(2006)も指摘している。無機態窒素の組成をみると、平水時においては、溶存態窒素DTNの63%を占める $\text{NO}_3\text{-N}$ がTINの93%を占めるが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は10%未満と、その大半は $\text{NO}_3\text{-N}$ により占められていた。出水時においても $\text{NO}_3\text{-N}$ はTINの90%を占め、TINの組成はほとんど変わらないことが分かった。また、出水時における無機態分の割合は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が全体の9%であるのに対し、TINは全体の62%と、出水時におけるTINの負荷寄与率はリンに比べ極めて大きいことが分かった。

次に6/29-30(1993)の出水時における、流量と水質濃度の変化をFig.5に示す。流量の減少とともに、COD、TN、TPともにその濃度は減少していくが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度推移は他項目と異なり、流量ピークの後も比較的高い濃度が維持されている。出水時における平均的溶存態窒素濃度(DTN)は、TN濃度の54%(Table2)であるが、その溶存態分の67%を占める $\text{NO}_3\text{-N}$ は他項目と異なる動態を示している(Fig.5c)。本研究においても数回確認しているが、その濃度上昇は、流量ピーク

より遅れて出てくる場合が多い。このような現象は、海老瀬(1986)や、平田・村岡(1991)も報告している。6/29-30(1993)の出水時においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度のピークは流量ピークの前にあるが、一度下がった濃度が流量ピーク後に、再び徐々に上昇していく状況が伺える。海老瀬(1985)は、降雨に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ の土壌層からの排出により、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は、流量逓減期でも高濃度を維持し、降雨量が大きいほど漸減しながらもより長期間高濃度レベルを維持する、と報告している。しかしながら、谷底部の飽和土壌域においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が脱窒によって消費されている(木平ら, 1997)という報告や、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が森林により吸収されるという黒田ら(1991)の報告もあり、流域における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の動態は、流域の特性も絡み、単純ではないと推察される。また中村・風間(2010)の山梨県笛吹川における出水時調査において、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出における降雨起源の水による窒素負荷は比較的少なく、基底流出の影響が大きいという報告もある。これらから、流域における窒素循環に係る基礎調査として、流域内降雨による負荷の見積もり(梅本ら, 2001)も含め、ベース水としての降雨が持つTIN濃度の、さらに詳細な調査を行っていく必要がある。

本研究においては流量による水質の評価は行わないが、流量と負荷量の関係を求める上で、流量と水質の関係を見ておくことは重要であると考え、本研究で得られたデータにおける流量と水質の関係について、対数軸上(Fig.6)で検討した。

COD、TN、TPは、ともに流量の増加に伴い水質値は上昇する傾向が伺える。一方、溶存成分であるTINと $\text{PO}_4\text{-P}$ も同様に、流量と水質値は正の関係にある。しかしながら、いずれの水質項目も同一流量に対しやや広がりを見せている。

出水時における水質濃度は、流量の上昇とともに上昇し、濃度ピーク後はループ状(山口・吉川, 1978)に逓減していくことが多い。したがって同じ流量でも、増水時の水質は減水時の水質に比べ高いことが多い。これは、晴天時における汚濁物質の流送過程において、河床に堆積した流域からの有機物や、水路や河床における付着藻類(阿部ら, 2002)等の有機物(武田ら, 1990; 内田ら, 2013)も、洪水流によって流されることが、出水時の流量の上昇期の水質に反映することに他ならないと考えられる。

流量と水質の関係では、出水規模が大きいほど掃流力は大きくなることから、斐伊川における過去の調査においても、流量規模が大きい出水の後ほど、同じ流量でも

ピーク後の水質は低い値になることが報告（落合・菅井，1981）されている。したがって出水時のデータ群の水質は、同じ流量に対しても、必然的に大きな広がりを持つことから、収集したデータ群の偏りが、回帰式の偏りにつながりうるものが推察される。対数軸においてはその特性から水質値の広がりが分りにくい、大きい流量域においてその値は広がりを持っている。

Fig. 5. Correlation between water flow rate and water quality in the Hii River.

図5. 斐伊川における流量と水質の関係。

Fig. 6. Variations in water flow rate and water quality under flood-flow conditions (29–30 June 1993) in the Hii River.

図6. 斐伊川の出水時における流量と水質の変化 (Jun29-30/1993)。

Table 3. LQ (Loading-flow rate) equations and coefficient of determination.

表3. LQ式と決定係数.

River	COD	TN	TIN	TP	PO ₄ -P	n
1 Hii-River	L = 8.3E-2Q ^{1.84} 0.90 L = 2.2Q ^{1.01} 0.78	L = 0.12Q ^{1.39} 0.89 L = 0.41Q ^{1.12} 0.87	L = 0.16Q ^{1.19} 0.93 L = 0.33Q ^{1.03} 0.79	L = 0.001Q ^{1.96} 0.77 L = 0.012Q ^{1.19} 0.81	L = 0.001Q ^{1.44} 0.89 L = 0.004Q ^{1.15} 0.80	201 ^{*1)} 176 ^{*3)} 77 ^{*2)} 102 ^{*4)}
2 Hiratahunagawa-River	L = 4.6Q ^{1.02} 0.94	L = 0.93Q ^{1.06} 0.92	L = 0.56Q ^{1.09} 0.88	L = 0.057Q ^{1.07} 0.87	L = 0.007Q ^{1.00} 0.68	31
3 Ronden-River	L = 4.3Q ^{1.05} 0.91	L = 0.99Q ^{1.06} 0.96	L = 0.77Q ^{1.19} 0.95	L = 0.085Q ^{1.20} 0.84	L = 0.012Q ^{1.31} 0.77	16
4 Goemon-River	L = 4.4Q ^{1.04} 0.93	L = 1.52Q ^{0.90} 0.85	L = 1.24Q ^{0.88} 0.76	L = 0.140Q ^{1.04} 0.93	L = 0.014Q ^{1.36} 0.65	17
5 Shintate-River	L = 4.1Q ^{0.91} 0.73	L = 1.03Q ^{0.98} 0.95	L = 0.80Q ^{1.08} 0.91	L = 0.065Q ^{0.95} 0.84	L = 0.019Q ^{1.04} 0.85	18
⑥ Shinsanbuichi-D. P.S	-	-	-	-	-	
⑦ Shinugan-D. P.S	-	-	-	-	-	
⑧ Shobarashinden-D. P.S	-	-	-	-	-	
9 Sasahu-River	L = 3.4Q ^{0.93} 0.71	L = 0.61Q ^{0.96} 0.82	L = 0.46Q ^{1.07} 0.83	L = 0.060Q ^{0.97} 0.67	L = 0.025Q ^{1.04} 0.81	21
⑩ Shinji-cho-drain	L = 6.5Q ^{0.97} 0.73	L = 1.25Q ^{1.06} 0.82	L = 0.93Q ^{1.20} 0.74	L = 0.167Q ^{1.02} 0.72	L = 0.031Q ^{0.88} 0.59	20
11 Dodho-River	L = 5.1Q ^{1.04} 0.85	L = 0.76Q ^{1.12} 0.86	L = 0.34Q ^{1.08} 0.86	L = 0.055Q ^{0.99} 0.78	L = 0.011Q ^{0.87} 0.80	21
⑫ Nishikimachi-drain	L = 7.0Q ^{1.02} 0.87	L = 0.68Q ^{0.92} 0.80	L = 0.38Q ^{0.94} 0.72	L = 0.088Q ^{0.98} 0.62	L = 0.016Q ^{0.93} 0.76	21
13 Kimachi-River	L = 3.3Q ^{0.95} 0.62	L = 0.60Q ^{1.13} 0.87	L = 0.45Q ^{1.33} 0.86	L = 0.045Q ^{1.01} 0.40	L = 0.010Q ^{1.10} 0.81	21
14 Higashikimachi-River	L = 5.1Q ^{1.03} 0.92	L = 0.56Q ^{1.10} 0.90	L = 0.38Q ^{1.26} 0.83	L = 0.062Q ^{1.04} 0.87	L = 0.019Q ^{0.99} 0.91	21
15 Matukure-River	L = 5.2Q ^{1.04} 0.88	L = 0.80Q ^{1.14} 0.93	L = 0.74Q ^{1.37} 0.88	L = 0.067Q ^{1.09} 0.86	L = 0.013Q ^{0.98} 0.93	21
16 Hongo-River	L = 5.6Q ^{1.02} 0.86	L = 1.14Q ^{1.14} 0.86	L = 1.39Q ^{1.44} 0.84	L = 0.134Q ^{1.32} 0.83	L = 0.020Q ^{1.16} 0.89	21
17 Tamayu-River	L = 3.2Q ^{0.98} 0.90	L = 0.68Q ^{1.10} 0.94	L = 0.51Q ^{1.20} 0.92	L = 0.053Q ^{0.96} 0.84	L = 0.020Q ^{0.92} 0.85	21
⑬ Hujina-drain	L = 6.1Q ^{1.05} 0.83	L = 0.94Q ^{1.14} 0.89	L = 0.59Q ^{1.18} 0.93	L = 0.120Q ^{1.11} 0.79	L = 0.015Q ^{0.91} 0.78	21
19 Inbe-River	L = 6.9Q ^{1.25} 0.90	L = 0.79Q ^{1.05} 0.91	L = 0.40Q ^{0.95} 0.79	L = 0.140Q ^{1.31} 0.86	L = 0.020Q ^{0.95} 0.80	21
20 Sannkyo-River	L = 7.7Q ^{0.92} 0.79	L = 3.87Q ^{0.93} 0.80	L = 3.04Q ^{0.93} 0.80	L = 0.357Q ^{0.94} 0.59	L = 0.096Q ^{0.85} 0.36	21
21 Kososhi-River	L = 5.5Q ^{0.96} 0.85	L = 0.87Q ^{1.00} 0.85	L = 0.66Q ^{1.19} 0.87	L = 0.100Q ^{0.96} 0.53	L = 0.039Q ^{1.18} 0.45	21
22 Higashinagae-River	L = 8.9Q ^{1.15} 0.83	L = 1.02Q ^{1.11} 0.95	L = 0.75Q ^{1.18} 0.95	L = 0.127Q ^{1.25} 0.82	L = 0.016Q ^{1.04} 0.87	18
23 Nishinagae-River	L = 8.0Q ^{1.19} 0.88	L = 0.98Q ^{1.24} 0.91	L = 0.72Q ^{1.38} 0.92	L = 0.120Q ^{1.26} 0.83	L = 0.030Q ^{1.18} 0.85	21
24 Aika-River	L = 5.6Q ^{1.06} 0.80	L = 1.08Q ^{1.14} 0.93	L = 0.75Q ^{1.20} 0.91	L = 0.096Q ^{1.05} 0.76	L = 0.026Q ^{0.89} 0.71	21
25 Okamoto-River	L = 6.2Q ^{1.09} 0.75	L = 1.33Q ^{1.03} 0.75	L = 1.11Q ^{1.05} 0.58	L = 0.126Q ^{1.04} 0.78	L = 0.040Q ^{0.88} 0.76	21
⑭ Ohgaki-cho-drain	L = 5.2Q ^{0.91} 0.79	L = 0.48Q ^{0.90} 0.75	L = 0.28Q ^{0.97} 0.73	L = 0.074Q ^{0.97} 0.72	L = 0.009Q ^{0.84} 0.78	21
27 Ohno-River	L = 2.7Q ^{0.85} 0.86	L = 1.32Q ^{1.16} 0.97	L = 1.56Q ^{1.37} 0.94	L = 0.049Q ^{0.91} 0.81	L = 0.027Q ^{0.92} 0.79	21
28 Kusano-River	L = 4.2Q ^{0.90} 0.92	L = 1.41Q ^{1.06} 0.95	L = 1.18Q ^{1.12} 0.92	L = 0.059Q ^{0.94} 0.82	L = 0.016Q ^{0.88} 0.85	21
29 Ino-River	L = 2.1Q ^{0.76} 0.91	L = 0.54Q ^{0.91} 0.92	L = 0.49Q ^{1.05} 0.87	L = 0.025Q ^{0.80} 0.81	L = 0.010Q ^{0.92} 0.81	21
⑮ Kozakae-cho-drain	L = 2.7Q ^{0.85} 0.90	L = 0.56Q ^{0.97} 0.94	L = 0.46Q ^{1.08} 0.92	L = 0.032Q ^{0.97} 0.89	L = 0.005Q ^{0.95} 0.90	20
31 Kozakae-River	L = 3.0Q ^{0.90} 0.91	L = 0.64Q ^{0.96} 0.94	L = 0.43Q ^{0.98} 0.92	L = 0.036Q ^{0.96} 0.87	L = 0.012Q ^{0.66} 0.65	20
32 Sakai-River	L = 3.2Q ^{0.92} 0.97	L = 0.50Q ^{1.04} 0.96	L = 0.36Q ^{1.18} 0.94	L = 0.043Q ^{0.79} 0.83	L = 0.018Q ^{1.12} 0.89	21

*1) $\geq 50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, (n=201) ; *2) $< 50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, (n=77) ; *3) $\geq 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, (n=176) ; *4) $< 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, (n=102)(L = g s^{-1} ; Q = $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)

流量と負荷量の関係

各河川、水路の流量と負荷量の関係

負荷量を求める方法としては、各流入河川において流量観測と水質観測を同時に数回重ねることにより、経験式である負荷量（L）と流量（Q）の関係式 $L=f(Q)$ を事前に求めておき、この関係式が求められた後は、流量の観測値から負荷量を近似的に算出する方法がある。精度の検討は必要であるが、流量をパラメータとして効率よく流入負荷量を概算するLQ式としては、一般的には $L=a \cdot Q^b$ の曲線式（べき乗回帰）による方法（海老瀬，1984）と、 $L=aQ+b$ の直線式（直線回帰）を用いる方法がある。どちらの再現性が良いか、検討（岩田ら，2013；高橋ら，2000）されてはいるが、田渕・林（1987）は霞ヶ浦流域の8河川における調査では、両者からの結果に大差なかったとしている。また、田渕・黒田（1993）はLQ式の直線型と曲線型に大差はないが、データ数が少ない場合（ $n=6$ ）には曲線型の誤差が大きくなってしまい、としている。また、高橋ら（2000）は降雨時負荷の推定値と実測値の比較から、線形回帰による最小二乗法で係数 a 、 b の値を同定し負荷量を算定すると、LQ式は大規模な出水時に実測値との誤差が大きい傾向が見られたことから、モデルの係数 a 、 b は高流量時や大規模出水時の負荷流出実態を反映できる方法で決定する必要がある、としている。いずれにせよ、河川規模や流域状況の違いもあることから、必ずしも同一のモデル式で評価出来ないところがあると考えられる。

本研究においては、LQ式として一般的な $L=aQ^b$ の形となる、べき乗回帰による方法を採用したが、Table 3に28地点において水質項目ごとに個々の観測データから最小二乗法により求めた回帰式（LQ式）と決定係数（ R^2 ）を示す。

決定係数はTNにおいては28地点すべてが0.7～0.9であった。またCOD、TINにおいては27地点が0.7～0.9（CODは0.6台1地点、TINは0.5台1地点）であったが、TPにおいては0.6台が2地点、0.6以下が3地点、 $PO_4\text{-P}$ では0.6台、0.6以下ともに3地点と、ややリンにおいてバラツキが大きく、再現性の悪いことが分かった。

斐伊川本川の流量と負荷量の関係

流量と水質の項（斐伊川における出水時の水質）で示したように（Fig.6参照）、流量と水質との関係において、平水時データ群と出水時データ群との間で、その傾きに差があることが分かったが、流量と水質の積で求め

られる負荷量と流量の関係も、当然、同様に平水時と出水時においてその傾きが異なることが想定される。回帰式は $L=aQ^b$ の形で示されるべき乗回帰として求めており、観測データ群の傾きは b の値で示される。Fig.7にCOD、TN、TIN、TP、 $PO_4\text{-P}$ それぞれの流量と負荷量の関係を示す。回帰式は、図内に平水時データ群から得られるもの①式と③式、出水時データ群から得られるもの②式と④式、そして全データから得られるもの⑤式の、五つに分けて回帰式を示している。

流量と負荷量の関係はべき乗回帰としているため、全体図は対数軸であるが、平水時データ群と出水時データ群の傾きの差をより分かりやすくするため、両データ群の境界の部分について線形軸（Fig.7a₂、b₂、c₂、d₂、e₂）でも表示した。図に示されるように、出水時データ群と平水時データ群の傾きは、TINにおいては、ほとんど差がないものの、COD、TN、TP、 $PO_4\text{-P}$ においては明らかに異なっており、回帰式における b （傾き）の値に差があることが分かる。CODにおいて b の値は出水時が1.52、平水時は1.13（Fig.7a₁）であるが、全データにおいては1.62（Fig.7A）となっている。TNにおいては出水時が1.41、平水時は1.16であるが、全データにおいては1.27、となりTPでは出水時が1.45、平水時は1.26であるが、全データでは1.73となっている。いずれの項目も出水時データ群の b 値は、平水時データ群のそれより値が大きくなっており、全データから得られる回帰式を使用して、全流量域における負荷量を算出すると、平水時流量域における負荷量の精度がかなり悪くなることが分かる。また $PO_4\text{-P}$ も、 b の値は出水時1.16、平水時1.11と近いが、境界部分の拡大図を見ると、全データによる回帰では出水時データ群の影響で傾き（1.35）が大きくなることが分かる。したがって、COD、TN、TP同様に、全体データから得られる回帰式を使用して全流量域における負荷量を算出することは、精度上問題がある。一方、TINも $PO_4\text{-P}$ 同様、出水時1.15、平水時1.23と他項目に比べ両者の b の値は比較的近いものの、両方の回帰式は段差を生じている。

水質の項で述べたように出水時の水質は、流量変化に対してループを描くことが多いため、海老瀬ら（1979）も指摘しているように出水単位で見ても、出水の前後半部において b の値が異なり、出水時データ群は、必然的に幅を持ったデータ群の集合体となり、平水時データ群よりバラツキが大きくなる。多田ら（2006）は流出負荷量推定における不確かさは、河川流量と濃度の母集団から抽出された標本（採水サンプル）集団が母集団に対し

Fig. 7. Correlations between the rate of water flow and loadings (COD, TN, TIN, TP, and $\text{PO}_4\text{-P}$) in the Hii River.

図7. 斐伊川における流量と負荷量の関係。

て偏った集団となっていることに起因する、と指摘しているが、水質の項でも述べたように、収集したデータ群の偏りを少なくするためには、より多くの観測データを収集することが必須事項となる。とくにデータ群が拡がりを持つ出水時の観測の充実が不可欠である。

本研究において、流量の大きい斐伊川については、

LQ式を平水時と出水時それぞれ別々に求めることとした。流量と負荷量の関係をみると、各項目ともに平水時データ群の方が出水時データ群に比べバラツキが少なかった。また、出水時と平水時のデータ群それぞれの傾きの接点が、窒素は $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 付近にあり、その他の項目は $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 付近にあることを見出した (Fig.7)。そこ

周辺部河川からの矢道湖への汚濁負荷流入特性

Table 4. Comparison of loadings of COD (chemical oxygen demand), TN (total nitrogen), TIN (total inorganic nitrogen), TP (total phosphorus), and PO₄-P (phosphate) from the Hii River (2009-2013) by LQ (Loading-flow rate) ⑤ and LQ④ plus LQ③.

表4. 斐伊川における、LQ式⑤と、LQ式④及びLQ式③による流出負荷量の比較。

year	mon.	COD (t mon. ⁻¹)			TN (t mon. ⁻¹)			TIN (t mon. ⁻¹)			TP (t mon. ⁻¹)			PO ₄ -P (t mon. ⁻¹)		
		A ^{*1)}	B ^{*2)}	(A/B)	A ^{*1)}	B ^{*2)}	(A/B)	A ^{*1)}	B ^{*2)}	(A/B)	A ^{*1)}	B ^{*2)}	(A/B)	A ^{*1)}	B ^{*2)}	(A/B)
2013	1	224	189	1.2	47.2	47.4	1.0	28.9	27.8	1.0	2.5	2.0	1.3	0.6	0.5	1.1
	2	196	158	1.2	41.9	42.1	1.0	25.7	24.8	1.0	2.2	1.6	1.3	0.5	0.5	1.2
	3	138	135	1.0	33.6	35.6	0.9	21.7	21.6	1.0	1.5	1.3	1.1	0.4	0.4	1.1
	4	293	223	1.3	58.4	57.1	1.0	34.8	32.9	1.1	3.4	2.4	1.4	0.8	0.6	1.2
	5	333	237	1.4	67.1	65.4	1.0	39.9	37.7	1.1	3.8	2.6	1.5	0.9	0.7	1.2
	6	433	331	1.3	75.8	72.3	1.0	43.1	40.3	1.1	5.2	3.8	1.4	1.0	0.9	1.2
	7	626	453	1.4	104.6	96.8	1.1	57.9	53.0	1.1	7.6	5.4	1.4	1.4	1.2	1.2
	8	628	480	1.3	101.2	95.3	1.1	55.5	51.5	1.1	7.7	5.8	1.3	1.4	1.2	1.2
	9	1,404	1,250	1.1	163.6	159.1	1.0	79.1	74.4	1.1	19.2	17.3	1.1	2.4	2.2	1.1
	10	1,259	1,165	1.1	133.4	133.3	1.0	61.7	59.0	1.0	17.7	16.5	1.1	2.0	1.9	1.1
	11	295	223	1.3	60.8	59.9	1.0	36.5	34.7	1.1	3.3	2.4	1.4	0.8	0.7	1.2
	12	416	301	1.4	76.8	72.7	1.1	44.2	41.1	1.1	4.9	3.4	1.4	1.0	0.9	1.2
2012	1	586	388	1.5	105.8	98.4	1.1	60.0	55.0	1.1	6.9	4.5	1.5	1.4	1.1	1.2
	2	442	297	1.5	83.7	79.5	1.1	48.5	45.0	1.1	5.1	3.3	1.5	1.1	0.9	1.2
	3	1,798	1,384	1.3	245.3	223.9	1.1	124.2	112.6	1.1	23.2	17.9	1.3	3.5	3.0	1.2
	4	567	386	1.5	100.7	93.4	1.1	56.8	52.1	1.1	6.7	4.5	1.5	1.3	1.1	1.2
	5	445	315	1.4	83.2	79.1	1.1	48.1	44.8	1.1	5.2	3.5	1.5	1.1	0.9	1.2
	6	605	463	1.3	97.9	93.0	1.1	53.9	50.2	1.1	7.4	5.6	1.3	1.3	1.1	1.2
	7	1,236	1,146	1.1	143.9	142.9	1.0	70.8	67.3	1.1	17.1	16.1	1.1	2.1	1.9	1.1
	8	129	101	1.3	26.3	26.9	1.0	16.4	16.1	1.0	1.5	1.0	1.5	0.3	0.3	1.2
	9	139	127	1.1	31.4	32.5	1.0	19.8	19.5	1.0	1.5	1.3	1.2	0.4	0.4	1.1
	10	73	80	0.9	18.7	20.6	0.9	12.6	12.8	1.0	0.8	0.7	1.0	0.2	0.2	1.0
	11	159	144	1.1	36.2	37.4	1.0	22.8	22.4	1.0	1.7	1.4	1.2	0.5	0.4	1.1
	12	226	185	1.2	49.0	49.4	1.0	30.1	29.1	1.0	2.5	1.9	1.3	0.6	0.5	1.1
2011	1	285	217	1.3	60.3	59.9	1.0	36.5	34.9	1.0	3.2	2.3	1.4	0.8	0.7	1.2
	2	666	259	2.6	107.1	100.4	1.1	58.5	54.0	1.1	8.2	6.0	1.4	1.5	1.2	1.2
	3	1,201	604	2.0	182.3	164.7	1.1	96.3	86.9	1.1	14.9	10.6	1.4	2.5	2.1	1.2
	4	448	250	1.8	85.6	81.4	1.1	49.6	46.2	1.1	5.2	3.4	1.5	1.1	0.9	1.2
	5	2,982	2,261	1.3	301.7	305.1	1.0	137.9	132.3	1.0	42.8	42.0	1.0	4.5	4.3	1.1
	6	663	415	1.6	114.6	105.7	1.1	63.9	58.4	1.1	7.9	5.2	1.5	1.5	1.3	1.2
	7	683	518	1.3	108.9	103.7	1.0	59.6	55.5	1.1	8.5	6.3	1.3	1.5	1.3	1.2
	8	525	279	1.9	91.6	84.7	1.1	51.6	47.3	1.1	6.3	3.3	1.9	1.2	0.9	1.3
	9	4,358	3,531	1.2	398.6	412.4	1.0	175.2	169.9	1.0	64.8	68.6	0.9	6.1	5.9	1.0
	10	273	200	1.4	56.8	56.4	1.0	34.4	32.8	1.0	3.1	2.2	1.4	0.7	0.6	1.2
	11	212	176	1.2	46.3	46.9	1.0	28.6	27.6	1.0	2.4	1.8	1.3	0.6	0.5	1.1
	12	596	358	1.7	105.8	98.8	1.1	59.8	55.0	1.1	7.1	4.7	1.5	1.4	1.2	1.2
2010	1	459	327	1.4	85.6	81.7	1.0	49.5	46.1	1.1	5.4	3.7	1.5	1.1	0.9	1.2
	2	439	304	1.4	81.7	77.2	1.1	47.0	43.6	1.1	5.1	3.4	1.5	1.1	0.9	1.2
	3	971	665	1.5	156.8	141.0	1.1	84.8	76.3	1.1	11.8	8.0	1.5	2.1	1.8	1.2
	4	722	505	1.4	119.8	111.3	1.1	66.0	60.5	1.1	8.8	6.1	1.4	1.6	1.3	1.2
	5	199	169	1.2	43.1	43.7	1.0	26.6	25.8	1.0	2.2	1.7	1.3	0.5	0.5	1.1
	6	560	428	1.3	88.9	84.0	1.1	48.6	45.1	1.1	6.9	5.2	1.3	1.2	1.0	1.2
	7	1,497	1,098	1.4	182.6	169.0	1.1	89.3	81.9	1.1	20.1	14.7	1.4	2.6	2.2	1.2
	8	761	595	1.3	111.3	104.7	1.1	58.8	54.4	1.1	9.7	7.5	1.3	1.5	1.3	1.1
	9	507	324	1.6	69.7	63.7	1.1	36.2	33.1	1.1	6.6	4.1	1.6	1.0	0.8	1.2
	10	515	405	1.3	78.3	74.0	1.1	42.1	39.2	1.1	6.5	5.0	1.3	1.1	0.9	1.1
	11	118	120	1.0	29.4	31.4	0.9	19.2	19.1	1.0	1.3	1.2	1.1	0.4	0.3	1.1
	12	296	225	1.3	59.8	58.7	1.0	35.8	33.9	1.1	3.4	2.4	1.4	0.8	0.7	1.2
2009	1	800	612	1.3	123.1	117.2	1.1	66.6	61.9	1.1	10.1	7.7	1.3	1.7	1.4	1.2
	2	1,031	731	1.4	158.9	142.6	1.1	84.4	75.8	1.1	12.8	9.0	1.4	2.2	1.8	1.2
	3	338	243	1.4	69.1	67.7	1.0	41.3	39.0	1.1	3.8	2.6	1.5	0.9	0.7	1.2
	4	273	215	1.3	55.0	54.1	1.0	33.0	31.3	1.1	3.1	2.3	1.3	0.7	0.6	1.2
	5	77	95	0.8	21.6	24.2	0.9	14.7	15.1	1.0	0.8	0.9	0.9	0.3	0.3	1.0
	6	442	386	1.1	61.3	60.3	1.0	32.3	30.9	1.0	5.8	4.9	1.2	0.9	0.8	1.1
	7	2,094	1,861	1.1	242.4	235.7	1.0	116.8	109.6	1.1	28.8	25.9	1.1	3.5	3.2	1.1
	8	224	180	1.2	48.0	48.2	1.0	29.4	28.3	1.0	2.5	1.9	1.3	0.6	0.5	1.2
	9	47	66	0.7	14.1	16.3	0.9	9.9	10.4	1.0	0.5	0.6	0.8	0.2	0.2	1.0
	10	172	152	1.1	35.6	36.0	1.0	21.9	21.3	1.0	2.0	1.6	1.2	0.5	0.4	1.1
	11	516	397	1.3	85.8	81.3	1.1	47.7	44.4	1.1	6.3	4.7	1.3	1.2	1.0	1.2
	12	194	170	1.1	44.5	45.8	1.0	27.9	27.2	1.0	2.1	1.7	1.2	0.6	0.5	1.1

*1) by LQ⑤ ; *2) by LQ④ plus LQ③

で窒素の平水時データ群における $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以上のデータについては、出水時データと合わせて扱うこととし、またその他の項目においては $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以上のデータについて、同様に出水時データと合わせて扱うこととした。そしてLQ式を算定するにあたり、バラツキの少ない平水時データ群からの回帰式を優先するために、まず窒素は $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以下のデータ群、その他の項目は $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以下のデータ群からLQ式を求め(③式)、その後、出水時データ群から得られるLQ式が窒素は $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、その他の項目は $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の位置を通るように回帰式(LQ式)を求めた(④式)。

LQ式⑤から得られる負荷量と、LQ式③と④から得られる負荷量の差

実際に、LQ式⑤から得られる負荷量とLQ式③と④から得られる負荷量の間にどの程度の差が出るのか、近年5年間(2009-2013)の流出負荷量を計算した。

流量年表における日平均流量から、日流出負荷量を計算し、月ごとの流出負荷量を積算集計した結果と、得られた流出負荷量から、LQ式⑤から得られる負荷量に対するLQ式③と④から得られる負荷量の割合を求めた。

結果をTable 4に示すが、ほとんどの月において、LQ式⑤から得られる負荷量はLQ式③と④から得られる負荷量より大きく、CODで2.6～0.7倍、TNで1.1～0.9倍、TINで1.1～1.0倍、TPで1.9～0.8倍、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で1.3～1.0倍とTN、TIN以外の項目においては大きく差が出ることが分かった。

この結果から、特にCOD、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ においては、全データから得られるLQ式⑤を使用して全流量域における負荷量を算出することは、精度上問題があると判断された。

周辺からの流出負荷特性

Fig.8に各地点における流量($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)と各負荷量(g s^{-1})の平均値を、項目ごとに集計したものを示す。なお、斐伊川については月1回の定期水質観測データ(1996-2001)の平均値とした。平水時における宍道湖への流入負荷は、流入水量の78%を占める斐伊川が、COD、TN、TIN、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ それぞれにおいて全体の60%、40%、62%、31%、36%と、高い割合を占めることが分かった。負荷量は流量値と水質値の積で求められる数値であることから、負荷量の大きさは流量の多少によるところが大きい。水質の項で述べたように、斐伊川のCOD値は周辺流入水中でもっとも数値が低く、宍道湖における環境

基準値(3.0 mg L^{-1})を下回る値である。宍道湖の平均的COD値(4.9 mg L^{-1} ;宍道湖湖心S3における2002-2013全層平均値)より低く、宍道湖水を希釈する水質値でありながら、斐伊川は最も大きいCOD負荷源ということになる。一方、斐伊川からのTN及びTPの負荷割合はそれぞれ40%及び31%であり、COD(60%)に比べて小さいものの、斐伊川からのTINの負荷割合が62%と高いことから、高濃度の $\text{PO}_4\text{-P}$ 負荷が合わさった折には、宍道湖内でCODに変換される潜在力となりうることに留意しなければならない。また、斐伊川以外の河川からの総流量は22%と小さいにもかかわらず、そのTN及びTPの負荷割合はそれぞれ60%及び69%を占めることも重要な負荷特性と言え、周辺からの流入負荷対策を考える上で熟考すべき点と考えられる。

周辺からの流入負荷におけるN/P比

無機態の栄養塩濃度は、流入先である宍道湖の湖内生産に直結する重要な要素であるが、周辺からの負荷において、そのN、Pバランスがどうであるか、流入負荷における無機態成分でのN/P(TIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$)比を検討した。Fig.9に示すように、宍道湖西岸域以外では流入負荷量の平均値におけるN/P比は10～62で平均24であるが、斐伊川の平水時におけるN/P比は75と窒素の比率がかなり高く、さらに斐伊川を除く西岸域地点は41～325(平均161)と、斐伊川の2倍以上高く、宍道湖西岸域地点は $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度に比べ、TIN濃度が特異的に高いことが分かった。

TIN負荷の寄与率が高い西岸域においては、湖底泥からの溶出(内部負荷)によって $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の高まる夏～秋に湖内生産の高まりが想定される。そこで夏から秋(6～10月)にかけてのデータを抽出し、N/P比を確認した。その結果この時期のN/P比は32～253(平均142)で、全データに比べやや値は小さくなるものの、無機態分の比率は同様に高いことが分かった。またTN/TP比は、全データで11～22(平均16)、夏から秋(6～10月)にかけては8.9～15(平均13)と、無機態分に比べ値は小さい。一方、斐伊川の流出負荷におけるTN/TP比を見ると、平水時の29から出水時には6.0と大きく減少している(Table2)ことから、リン負荷は相対的に懸濁態として出水時に高まることが明らかになった。懸濁態として宍道湖に流入したリンは湖底に堆積し、窒素に比べより時間差をもって、二次的に湖水質に影響を与えている可能性が示唆される。

周辺部河川からの矢道湖への汚濁負荷流入特性

Fig. 8. Contribution ratios of select rivers to pollutants and water flow into Lake Shinji.

図8. 矢道湖への汚濁負荷量と流入水量における各河川の寄与率。

Fig. 9. Ratios of TIN and PO₄-P loads in each river.

図9. 各流入河川のTIN/PO₄-P負荷比。

Table 5. Correlation matrix of flow rates.

表5. 各流量の相関行列.

River	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
1 Hii-River																																	
2 Hiratahuna-River	-																																
3 Ronden-River	0.26	-																															
4 Goemon-River	-0.13	-	-0.25																														
5 Shintate-River	0.53 *	-	0.45	-0.33																													
6 Shinsunbuichi D. P. S.	-	-	-	-	-																												
7 Shinugan-D. P. S.	-	-	-	-	-	-																											
8 Shobarashinden-D. P. S.	-	-	-	-	-	-	-																										
9 Sasahu-River	0.03	-	0.26	0.36	0.15	-	-	-	-																								
10 Shinji-Drain	-0.07	-	-0.01	0.62 *	-0.06	-	-	-	0.55 *	-																							
11 Dodo-River	-0.07	-	0.04	0.22	-0.27	-	-	-	0.08	0.45	-																						
12 Nishikimachi-Drain	-0.11	-	-0.04	0.90 *	-0.14	-	-	-	0.61 **	0.78 **	0.34	-																					
13 Kimachi-River	0.36	-	0.58 *	-0.20	0.63 *	-	-	-	0.33	0.27	0.08	0.18	-																				
14 Higashikimachi-River	0.12	-	0.90 *	-0.13	0.26	-	-	-	0.36	0.41	0.39	0.26	0.56 **	-																			
15 Maokure-River	0.07	-	0.33	-0.28	0.19	-	-	-	0.33	0.23	0.03	0.14	0.55 *	0.59 *	-																		
16 Hongo-River	0.14	-	0.36	-0.18	0.28	-	-	-	0.27	0.22	0.00	0.16	0.60 **	0.58 **	0.87 *	-																	
17 Tanayu-River	0.15	-	0.48	-0.26	0.33	-	-	-	0.46 *	0.14	-0.04	0.04	0.62 *	0.62 **	0.85 **	0.81 **	-																
18 Hujina-Drain	0.30	-	0.83 *	-0.25	0.42	-	-	-	0.44	0.26	0.19	0.15	0.75 **	0.89 **	0.74 *	0.73 *	0.80 **	-															
19 Inbo-River	0.19	-	0.51	-0.17	0.28	-	-	-	0.22	0.07	0.01	0.04	0.54 *	0.65 **	0.85 **	0.85 *	0.73 *	0.79 *	-														
20 Samkyo-River	0.31	-	-0.18	-0.14	-0.08	-	-	-	-0.08	0.20	0.21	-0.08	0.36	-0.03	0.18	0.02	0.06	0.07	0.07	-													
21 Kososhi-River	0.35	-	0.28	-0.15	0.30	-	-	-	0.09	0.21	0.14	0.14	0.46 *	0.32	0.16	0.27	0.18	0.39	0.10	-0.02	-												
22 Higashinagae-River	0.73 **	-	-0.02	-0.12	0.22	-	-	-	-0.07	-0.06	-0.14	-0.01	0.31	-0.06	0.15	0.21	0.04	0.16	0.14	0.33	0.61 *	-											
23 Nishinagae-River	0.77 **	-	0.07	-0.21	0.41	-	-	-	0.08	0.01	-0.10	-0.05	0.51 *	0.03	0.25	0.27	0.22	0.33	0.20	0.39	0.61 **	0.93 **	-										
24 Aika-River	0.59 *	-	0.30	-0.22	0.60 *	-	-	-	0.27	0.24	0.14	0.14	0.73 **	0.34	0.40	0.45 *	0.41	0.57 **	0.32	0.24	0.66 *	0.77 *	0.86 **	-									
25 Okamoto-River	0.66 **	-	0.13	-0.25	0.51 *	-	-	-	0.19	0.08	-0.05	-0.03	0.58 **	0.16	0.39	0.46 *	0.35	0.44	0.36	0.27	0.58 *	0.89 **	0.92 **	0.92 **	-								
26 Ohgaki-Drain	0.35	-	0.46	-0.33	0.65 **	-	-	-	0.41	0.08	-0.06	0.03	0.80 **	0.36	0.41	0.45 *	0.50 *	0.64 **	0.36	0.12	0.54 *	0.47	0.67 **	0.86 **	0.77 *	-							
27 Ohno-River	0.06	-	0.37	-0.23	0.46	-	-	-	0.38	0.25	0.08	0.14	0.75 **	0.58 **	0.85 **	0.86 *	0.87 *	0.77 *	0.76 **	0.14	0.23	0.04	0.25	0.53 *	0.42	0.62 *	-						
28 Kusano-River	0.14	-	0.43	-0.24	0.69 *	-	-	-	0.47 *	0.28	0.12	0.18	0.75 **	0.44	0.40	0.44	0.57 *	0.64 **	0.29	-0.02	0.46 *	0.10	0.38	0.73 *	0.49 *	0.86 **	0.73 **	-					
29 Ino-River	0.16	-	0.08	-0.34	0.59 *	-	-	-	0.44	0.26	-0.03	0.00	0.58 **	0.18	0.42	0.37	0.57 **	0.39	0.25	0.32	0.10	-0.04	0.27	0.42	0.34	0.56 *	0.67 **	0.68 **	-				
30 Kozakae-Drain	0.17	-	0.56 *	-0.26	0.67 **	-	-	-	0.50 *	0.32	0.41	0.15	0.78 **	0.62 *	0.56 *	0.53 *	0.73 *	0.77 *	0.46 *	0.09	0.32	0.01	0.29	0.67 **	0.44	0.78 *	0.81 **	0.93 **	0.72 **	-			
31 Kozakae-River	0.22	-	0.26	-0.26	-0.01	-	-	-	0.21	0.19	0.31	-0.05	0.48 *	0.39	0.46 *	0.31	0.59 *	0.47 *	0.27	0.66 **	0.07	0.00	0.22	0.21	0.11	0.22	0.45	0.24	0.56 *	0.42	-		
32 Sakai-River	-0.02	-	0.22	-0.37	0.57 *	-	-	-	0.40	0.09	0.05	0.05	0.57 **	0.21	0.32	0.28	0.49 *	0.42	0.11	-0.08	0.40	-0.02	0.27	0.58 *	0.38	0.76 *	0.60 **	0.89 *	0.70 *	0.80 **	0.24	-	

* and ** indicates significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

* and ** indicates significance at P<0.05 and P<0.01, respectively.

流入水間の流量相関

LQ式から負荷量を算出するためには、各河川・水路ごとの連続した流量観測データが必要である。しかしながら、現実的には連続した流量観測データが得られる河川は、島根県の水位観測所のある玉湯川、来待川そして国土交通省の流量観測所のある斐伊川の3河川しかない。そこで流域面積の最も大きい斐伊川を除く周辺河川間において、本研究における流量観測値について相関分析を行った。

得られた相関行列をTable 5に示す。表で分かるように、玉湯川と来待川は比較的多くの河川と有意な相関を示し、来待川で27河川中19河川を、玉湯川で12河川をカバー出来ることが分かった。一方、宍道湖北岸においては水位観測所が未設置であるが、秋鹿川と伊野川の2河川で、宍道湖北岸12河川すべてがカバー出来ることが分かった。より精度の高い流入負荷を算定するため、秋鹿川と伊野川に宍道湖北岸における水位観測所の設置が望まれる。

まとめ

斐伊川を含む宍道湖周辺24河川と5小水路における、個々の観測データから流量と水質負荷量の関係式として水質項目ごとに、べき乗形の $L=aQ^b$ による回帰式(LQ式)を求めたが、斐伊川における $L=aQ^b$ 式において、 b の値が平水時と出水時において明らかに異なることがわかった。

LQ式⑤(全データ)から得られる負荷量は、LQ式③(平水時データ)と④(出水時データ)から得られる負荷量より大きく、CODで2.6~0.7倍、TNで1.1~0.9倍、TINで1.1~1.0倍、TPで1.9~0.8倍、 $PO_4\text{-P}$ で1.3~1.0倍と、TN、TIN以外の項目においては、大きく差が出ることが分かった。

この結果から、特にCOD、TP、 $PO_4\text{-P}$ においては、全データから得られるLQ式⑤を使用して全流量域における負荷量を算出することは、精度上問題があると判断された。

平水時における宍道湖への流入負荷は、流入水量の78%を占める斐伊川が、COD、TN、TIN、TP、 $PO_4\text{-P}$ それぞれにおいて全体の60%、40%、62%、31%、36%と高く、COD、TINにおいて特に高い割合であることが分かった(Fig.8参照)。しかしながら各水質の平均値を見ると、斐伊川は、COD値とTP濃度は32の流入河川・水路中、最も低く、TN濃度は32河川・水路中19位、TIN濃度は11位であるが、 $PO_4\text{-P}$ 濃度は3位と、CODとリン濃度において上位にランクされることが分かった。また、

流入河川の水質平均値に対して、クラスター分析を行ったところ、流入水の水質は5つのクラスターに分類されたが、斐伊川を除く宍道湖西岸域地点は $PO_4\text{-P}$ 濃度に比べ、TIN濃度が特異的に高いことが分かった。

斐伊川の流出負荷においては、懸濁態CODが平水時の17%に対し出水時には75%に増加するが、懸濁態窒素は平水時の9%に対し出水時に46%となり、出水時においても、溶存態の比率がやや高いことが分かった。また逆にリンは、平水時においても50%が懸濁態であるが、出水時にはさらに85%に増加し、COD、窒素に比べると平水時、出水時ともに懸濁態の比率の高いことが分かった。またTN/TP比を見ると、平水時の29が出水時には6.0に減少し、リンの負荷は相対的に出水時において高まることが明らかになった。

文 献

- 阿部信一郎・南雲 保・田中次郎(2002):ロジスティックモデルによる河川付着藻類群落の量的動態の解析.陸水学雑誌, 63:209-213.
- Ishitobi Y., M. kawatsu, H. kamiya, K. Hayashi, h. Esumi (1988): Estimation of water quality and nutrient loads in the hii river by semi-daily sampling., Jpn. j. Limnol., 49: 11-17.
- 岩田杉夫・遠藤忠嗣・井上隆信・横田久里子・大久保陽子(2013):中小河川からの栄養塩負荷の流出特性.水環境学会誌, 36:39-47.
- 内田朝子・大八木麻希・加藤元海・中西正己(2013):矢作川の生態系を支える付着藻類の栄養状態.陸水学雑誌, 74:63-72.
- 梅本 諭・駒井幸雄・井上隆信(2001):都市域,山林域における湿性降水物および全大気降水物による窒素,リンの負荷量.水質汚濁研究, 24:300-307.
- 海老瀬潜一・宗宮 功・大楽尚史(1979):市街地河川における降雨時流出負荷量の変化特性.水質汚濁研究, 2:33-44.
- 海老瀬潜一(1981):霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価.国立公害研究所研究報告, 21:2-130.
- 海老瀬潜一(1984):霞ヶ浦流入河川による総流入負荷量の評価.国立公害研究所研究報告, 50:59-88.
- 海老瀬潜一(1985):降雨による土壌層から河川への NO_3^- の排出.衛生工学研究論文集, 21:57-68.
- 海老瀬潜一(1986):陰イオン物質流出動態の土地利用形態による相違.水理講演会論文集, 30:37-42.

- 大槻 均 (2000) : 琵琶湖の水質と面源負荷. 環境技術, 29 : 502-508.
- 落合久栄・菅井隆吉 (1981) : 斐伊川における出水時の汚濁流出について (I). 用水と廃水, 23 : 59-65.
- 神谷宏・石飛裕・井上徹教・中村由行・山室真澄 (1996) : 夏季の宍道湖底層水に蓄積する栄養塩の起源. 陸水学雑誌, 57 : 313-326.
- 神谷宏・石飛裕・井上徹教・中村由行・山室真澄 (2001) : 富栄養化した汽水湖沼における高水温・貧酸素時の堆積物からの溶存有機態リン (DOP) とリン酸の溶出. 陸水学雑誌, 62 : 11-21.
- Kamiya H., Y. Kano, K. Mishima, K. Yoshioka, O. Mitamura and Y. Ishitobi (2008); Estimation of long-term variation in nutrient loads from the Hii River by comparing the change in observed and calculated loads in the catchment. Landscape Ecological Engineering, 4: 39-46.
- 國松孝男・須戸 幹 (1993) : 山地河川の窒素・リン・CODの濃度とその変動特性—森林 (油日岳実験流域) からの汚濁負荷流出機構 (I) —. 農土論集, 166 : 35-44.
- 黒田久雄・田淵俊雄・菊池英樹・鈴木正道 (1991) : 森林小集水域における流出水の濃度と流出負荷. 農業土木学会論文集, 154 : 25-35.
- 建設省 (1979) : 1978年度 河川現況調査 中国地方編, 建設省中国地方建設局.
- 建設省 (1986) : 建設省河川砂防技術基準 (案) 調査編, 日本河川協会.
- 木平英一・楊宗興・戸田任重・八木一行・窪田順平・塚本良則 (1997) : 森林流域谷底部土壌の脱窒作用— NO_3^- -N窒素安定同位体比による解析—. 日林誌, 79 : 83-88.
- 近藤 正・三沢真一・豊田 勝 (1993) : 代かき田植時期のN, P成分の流出特性について. 農業土木学会論文集, 164 : 147-155.
- 島根県 (2010) : 宍道湖に係わる湖沼水質保全計画, 島根県.
- 菅井隆吉・西尾正博・溝山 勇・清家 泰 (2012) : 汽水湖宍道湖における湖底堆積物からの無機栄養塩の回帰速度. 陸水学雑誌, 73 : 179-186.
- 菅井隆吉・伊藤 健・西尾正博・溝山 勇・菅原庄悟・清家 泰 (2015) : 二つの繋がった汽水湖における湖底堆積物からの窒素, リン及びDOCの回帰速度からみた水域の特性評価. 陸水学雑誌, 76 : 35-44.
- 高島英二郎・田中宏明・中村栄一 (1995) : 手賀沼流入河川における汚濁負荷量の流出特性および年間負荷量の把握. 水環境学会誌, 18 : 297-306.
- 高橋順二・長谷部均・白谷栄作・吉永育生 (2000) : 河川流域における降雨時流出負荷量の算定に及ぼす影響要因. 水文・水資源学会誌, 13 : 216-226.
- 武田育郎・国松孝男・小林慎太郎・丸山利輔 (1990) : 降雨時における水田群からの汚濁負荷流出—水田群からの汚濁負荷流出に関する研究 (I) —. 農業土木学会論文集, 147 : 79-85.
- 武田育郎・国松孝男・小林慎太郎・丸山利輔 (1991) : 水系における水田群の汚濁物質の収支と流出負荷量—水田群からの汚濁負荷流出に関する研究 (II) —. 農業土木学会論文集, 153 : 63-72.
- 多田明夫・田中丸治哉・畑 武志 (2006) : 集水域からの流出負荷量の推定法とその不確かさについて. 農業土木学会論文集, 245 : 109-122.
- 田淵俊雄・高村義親・久保田治夫・鈴木誠治 (1979) : 水田における窒素, リン濃度とその流出入. 農業土木学会誌, 47 : 859-864.
- 田淵俊雄・林 寛司 (1987) : 流量・負荷量関係式の信頼性について. 農土論集, 131 : 11-18.
- 田淵俊雄・黒田久雄 (1993) : LQ式による流出負荷量算出に与える測定頻度の影響. 農土論集, 164 : 1-9.
- 中村高志・風間ふたば (2010) : 扇状地河川における出水時の硝酸イオン流出～水の酸素安定同位体比を用いた検討～. 水環境学会誌, 33 : 11-16.
- 平田健正・村岡公爾 (1991) : 筑波森林試験地における土壌水質および渓流水質の季節変化について. 水工学論文集, 35 : 105-110.
- 宮廻隆洋・菅原省吾・田林 雄・大城 等・小山維尊・中島結衣・神谷 宏・清家 泰 (2014) : 島根県東部を流れる斐伊川における実測負荷と二次のLQ式を用いた計算負荷量との比較. 陸水学雑誌, 75 : 151-159.
- 森田弘昭・山田幸男・安中徳二 (1985) : 洪水時に湖に流入する粒子性栄養塩の挙動. 水質汚濁研究, 8 : 233-238.
- 山口高志・吉川勝秀 (1978) : 河川の水質・汚濁負荷量に関する研究 (I). 国立公害研究所研究報告, 151 : 89-141.
- 山口高志・吉川勝秀 (1980) : 河川の水質・汚濁負荷量に関する研究 (II). 国立公害研究所研究報告, 154 : 1-43.
- 和田安彦・三浦浩之 (1996) : 湖沼集水域での汚濁負荷の発生とその制御. 水環境学会誌, 19 : 161-169.

和田桂子・藤井慈穂（2006）：雨天時における路面排水
の水質特性および汚濁負荷の流出挙動に関する研究．
水質汚濁研究，29：699-704.

菅井隆吉ほか

Appendix. Water quality (pollutants) and flow rate of sampling sites.

付表. 各河川及び水路, 樋門における水質と流量.

River			Flow rate m ³ s ⁻¹	COD mg L ⁻¹	TN mg L ⁻¹	TIN mg L ⁻¹	NH ₄ -N mg L ⁻¹	NO ₂ -N mg L ⁻¹	NO ₃ -N mg L ⁻¹	TP mg L ⁻¹	PO ₄ -P mg L ⁻¹
1 (normal-flow)	Hii-River	Ave.	34.5	2.3	0.66	0.41	0.03	0.004	0.38	0.023	0.006
		Max.	151	4.0	1.23	0.64	0.14	0.014	0.59	0.050	0.014
		Min.	5.59	1.3	0.35	0.18	<0.01	<0.001	0.16	0.011	<0.005
2	Hiratahuna-River	Ave.	3.09	4.8	1.00	0.64	0.16	0.020	0.46	0.064	0.009
		Max.	10.9	7.5	1.53	1.16	0.32	0.039	0.89	0.117	0.031
		Min.	0.178	2.5	0.30	0.25	0.03	<0.001	0.12	0.029	<0.005
3	Ronden-River	Ave.	0.713	4.3	0.96	0.70	0.36	0.014	0.32	0.082	0.012
		Max.	2.79	7.3	1.25	0.93	0.59	0.031	0.61	0.158	0.031
		Min.	0.116	2.4	0.73	0.37	0.17	0.005	0.17	0.030	<0.005
4	Goemon-River	Ave.	0.968	4.5	1.61	1.34	0.80	0.034	0.51	0.140	0.015
		Max.	3.31	7.4	2.67	2.26	1.63	0.081	1.47	0.196	0.037
		Min.	0.327	3.3	1.08	0.80	0.30	0.014	0.31	0.092	<0.005
5	Shintate-River	Ave.	0.735	4.7	1.05	0.79	0.13	0.022	0.63	0.069	0.020
		Max.	3.13	13.4	1.41	1.13	0.24	0.052	1.01	0.106	0.034
		Min.	0.200	2.3	0.81	0.53	0.01	0.010	0.33	0.036	0.011
⑥	Shinsanbuichi D. P. S.	Ave.	0.870	4.4	1.39	1.06	0.67	0.018	0.37	0.075	0.007
		Max.	0.870	11.2	5.28	4.83	1.21	0.062	3.82	0.292	0.046
		Min.	0.870	2.3	0.75	0.11	0.08	<0.001	0.03	0.031	<0.005
⑦	Shinugan-D. P. S.	Ave.	0.580	5.2	1.87	1.42	0.76	0.037	0.62	0.097	0.007
		Max.	0.580	10.4	8.73	3.58	3.16	0.077	1.67	0.410	0.036
		Min.	0.580	3.0	1.01	0.26	0.14	0.006	0.03	0.038	<0.005
⑧	Shobarashinden-D. P. S.	Ave.	0.240	5.9	1.98	1.55	1.14	0.032	0.38	0.089	0.010
		Max.	0.240	8.5	4.39	4.09	2.94	0.452	1.76	0.272	0.128
		Min.	0.240	3.8	0.87	0.15	0.02	0.007	0.07	0.017	<0.005
9	Sasahu-River	Ave.	0.326	4.1	0.69	0.45	0.12	0.015	0.32	0.071	0.025
		Max.	0.914	11.8	2.08	1.32	0.21	0.054	1.08	0.205	0.051
		Min.	0.080	2.0	0.44	0.25	0.05	0.005	0.11	0.031	0.014
⑩	Shinji-Drain	Ave.	0.038	8.5	1.10	0.55	0.14	0.026	0.38	0.181	0.063
		Max.	0.168	25.6	3.04	2.17	1.03	0.175	0.96	0.490	0.201
		Min.	0.003	2.9	0.35	0.08	0.01	0.007	0.06	0.052	0.017
11	Dodho-River	Ave.	0.132	4.9	0.61	0.31	0.08	0.013	0.21	0.064	0.016
		Max.	0.497	9.9	1.20	0.70	0.21	0.068	0.65	0.164	0.027
		Min.	0.014	2.1	0.23	0.15	0.02	0.004	0.06	0.024	0.005
⑫	Nishikimachi-Drain	Ave.	0.058	7.3	1.00	0.58	0.25	0.011	0.32	0.136	0.023
		Max.	0.299	17.5	2.46	1.61	1.05	0.028	0.87	0.665	0.055
		Min.	0.004	3.7	0.27	0.16	0.03	0.005	0.09	0.020	0.005
13	Kimachi-River	Ave.	0.437	3.8	0.54	0.34	0.05	0.009	0.28	0.060	0.009
		Max.	1.14	10.1	1.04	0.61	0.13	0.020	0.51	0.262	0.014
		Min.	0.128	1.6	0.34	0.12	0.01	0.004	0.06	0.011	0.005
14	Higasikimachi-River	Ave.	0.029	4.9	0.41	0.16	0.03	0.006	0.13	0.060	0.020
		Max.	0.142	9.7	0.82	0.47	0.11	0.020	0.41	0.184	0.043
		Min.	0.001	2.2	0.15	0.03	0.02	0.001	0.01	0.017	0.008
15	Matukure-River	Ave.	0.057	5.1	0.54	0.27	0.04	0.007	0.23	0.061	0.015
		Max.	0.317	18.4	1.43	0.70	0.10	0.035	0.63	0.291	0.030
		Min.	0.002	1.9	0.26	0.04	0.02	0.003	0.02	0.018	0.008
16	Hongo-River	Ave.	0.092	5.8	0.89	0.56	0.16	0.017	0.38	0.073	0.014
		Max.	0.348	17.4	2.90	2.41	1.78	0.097	0.74	0.296	0.037
		Min.	0.003	2.2	0.31	0.05	0.02	0.004	0.02	0.013	0.005
17	Tamayu-River	Ave.	0.273	3.4	0.59	0.39	0.04	0.007	0.34	0.060	0.024
		Max.	0.700	6.5	0.94	0.68	0.09	0.017	0.59	0.153	0.061
		Min.	0.019	2.0	0.39	0.17	0.01	0.004	0.14	0.031	0.015
⑮	Hujina-Drain	Ave.	0.040	5.9	0.62	0.32	0.09	0.010	0.22	0.103	0.025
		Max.	0.165	22.2	1.36	0.71	0.32	0.031	0.66	0.587	0.077
		Min.	0.004	2.4	0.21	0.17	0.03	0.004	0.06	0.031	0.007
19	Inbe-River	Ave.	0.364	5.5	0.78	0.49	0.07	0.012	0.41	0.116	0.024
		Max.	1.59	17.5	1.57	1.35	0.25	0.025	1.08	0.531	0.057
		Min.	0.044	2.4	0.45	0.19	0.02	0.004	0.16	0.045	0.008
20	Sannkyo-River	Ave.	0.231	10.3	5.03	3.94	2.42	0.159	1.37	0.560	0.239
		Max.	1.01	33.6	12.2	10.5	9.69	0.317	3.69	2.130	1.05
		Min.	0.011	3.8	2.29	1.76	0.40	0.046	0.06	0.080	0.015
21	Kososhi-River	Ave.	0.183	6.5	0.96	0.50	0.16	0.013	0.33	0.170	0.065
		Max.	0.582	13.5	2.16	1.31	0.68	0.048	0.86	0.654	0.304
		Min.	0.006	2.6	0.27	0.15	0.02	0.003	0.06	0.019	<0.005
22	Higashinagae-River	Ave.	0.052	6.5	0.71	0.40	0.05	0.009	0.34	0.069	0.015
		Max.	0.481	35.0	1.40	0.58	0.16	0.024	0.54	0.398	0.036
		Min.	0.004	2.5	0.39	0.14	0.01	0.003	0.11	0.019	0.007
23	Nishinagae-River	Ave.	0.097	5.5	0.55	0.28	0.04	0.005	0.24	0.076	0.022
		Max.	0.604	25.8	1.73	0.83	0.08	0.013	0.79	0.440	0.096
		Min.	0.005	2.0	0.17	0.07	0.01	0.001	0.02	0.017	0.007
24	Aika-River	Ave.	0.168	5.8	0.83	0.51	0.10	0.016	0.39	0.106	0.041
		Max.	0.972	29.2	1.56	1.11	0.46	0.073	1.08	0.406	0.129
		Min.	0.026	2.2	0.31	0.14	0.02	0.002	0.10	0.035	0.012
25	Okamoto-River	Ave.	0.055	6.2	1.51	1.17	0.14	0.023	1.01	0.131	0.070
		Max.	0.233	42.3	7.39	6.51	1.00	0.108	6.06	0.415	0.265
		Min.	0.006	1.9	0.47	0.16	0.02	0.002	0.12	0.055	0.033
⑮	Ohgaki-Drain	Ave.	0.043	8.7	0.85	0.44	0.22	0.012	0.21	0.119	0.019
		Max.	0.188	38.1	3.20	3.20	2.81	0.040	0.51	0.738	0.062
		Min.	0.002	3.7	0.24	0.12	<0.01	0.003	0.08	0.038	0.006
27	Ohno-River	Ave.	0.093	4.5	0.86	0.60	0.04	0.010	0.55	0.073	0.038
		Max.	0.498	11.0	1.38	1.21	0.19	0.073	1.18	0.225	0.099
		Min.	0.008	2.2	0.42	0.15	<0.01	0.002	0.09	0.023	0.008
28	Kusano-River	Ave.	0.129	5.9	1.23	0.88	0.22	0.039	0.63	0.080	0.025
		Max.	1.41	11.7	2.53	2.03	1.28	0.155	1.38	0.169	0.049
		Min.	0.012	3.1	0.56	0.26	0.03	0.008	0.22	0.021	0.008
29	Ino-River	Ave.	0.109	4.5	0.74	0.47	0.07	0.011	0.39	0.048	0.014
		Max.	0.373	8.1	1.35	0.97	0.57	0.047	0.92	0.117	0.060
		Min.	0.006	2.3	0.31	0.10	0.01	0.003	0.07	0.015	0.005
⑮	Kozakae-Drain	Ave.	0.035	5.1	0.66	0.36	0.08	0.009	0.27	0.039	0.007
		Max.	0.155	8.8	1.04	0.67	0.30	0.028	0.63	0.082	0.019
		Min.	0.003	2.6	0.42	0.20	<0.01	0.002	0.15	0.018	<0.005
31	Kozakae-River	Ave.	0.144	4.2	0.74	0.48	0.08	0.019	0.39	0.082	0.037
		Max.	0.775	7.9	1.29	0.90	0.21	0.091	0.86	0.151	0.086
		Min.	0.011	2.4	0.48	0.25	0.02	0.003	0.20	0.028	0.009
32	Sakai-River	Ave.	0.175	4.2	0.47	0.25	0.04	0.006	0.21	0.047	0.016
		Max.	1.45	6.1	1.02	0.86	0.07	0.013	0.80	0.104	0.057
		Min.	0.004	2.4	0.24	0.07	<0.01	0.002	0.04	0.012	<0.005