

斐伊川から宍道湖へ流出する汚濁負荷量の推定

武田育郎¹⁾・福島 晟¹⁾・森也寸志¹⁾

An estimation of runoff loads of pollutants from River Hii to Lake Shinji

Ikuo Takeda¹⁾, Akira Fukushima¹⁾ and Yasushi Mori¹⁾

Abstract: The runoff loads of pollutants such as nitrogen, phosphorus and COD in River Hii were estimated for 3 years from the weekly sampling data collected at the middle stream point (Kisuki) and the downstream point (Otsu) by using the L-Q equations. The annual runoff loads varied widely for the three years, because there were large differences in the amount of precipitation (from 1,308mm/y to 2,307mm/y) and runoff discharge. The largest annual loads at the downstream point for T-N, T-P and T-COD were calculated to be 1,090ton/y, 49.6ton/y and 3,290ton/y, respectively, whereas the smallest loads for T-N, T-P and T-COD were 483ton/y, 22.8ton/y and 1,530ton/y, respectively. The loads at the middle stream point were estimated to be about half of the loads at the downstream point.

Key words: L-Q equation, precipitation, pollution load, runoff discharge, water quality

ま え が き

島根県東部に位置する宍道湖と中海は、1990年に湖沼水質保全特別措置法による指定湖沼となり、湖沼の富栄養化と水質改善が多くの関心を集めている。この2つの汽水湖は、中国山地の船通山を源とし境水道から日本海へ通ずる斐伊川水系(流域面積=2,070km²)の下流域を構成している。

斐伊川水系の中の最大の河川である斐伊川は、宍道湖に流入する淡水量の約80%を占めているといわれている。建設省河川局(1995)によれば、斐伊川の大津地点(図1参照)の1957年~1992年までの年間平均流量は12.77億m³/yで、これは宍道湖の貯水量(3.66億m³)、中海の貯水量(5.21億m³)のそれぞれ3.5倍、2.5倍に相当する。したがって、宍道湖と中海の水質環境を考える上で、斐伊川の水質と負荷量の特徴を把握しておくことは重要である。

斐伊川では、現在、木次地点と大津地点(図1参照)の環境基準点で、行政関連機関によって年間12

回の水質測定が行われている。河川における環境基準の適否の判断は、75%非超過確率水質値を低水時の水質と近似的にみなしているため、こうした年間12回程度の測定値が用いられる場合が多い。

しかしながら、流域からの汚濁負荷量を考える場合は、降水に伴う出水時の水質も考慮する必要がある。なぜならば、概して河川流域からの汚濁負荷の流出は、出水時に集中することが多いからである。河川において、出水時に1時間程度の採水間隔で水質を測定した國松(1986)の研究によれば、降雨時の負荷量は低平水時の数100倍になることが報告されている。また、年間の汚濁負荷流出に占める降雨時負荷量の割合は、霞ヶ浦集水域でT-N=29%、T-P=51%、T-COD=53%(海老瀬, 1984)、あるいは琵琶湖集水域でT-P=79%(國松, 1986)という結果も報告されている。斐伊川では、1979年の3出水についての調査(落合ほか, 1981)があり、最も大きな出水時の負荷量は、平水時の負荷量のT-Nで71日分、T-Pで400日分、CODで563日分であったと報告されている。しかしながら、このような詳細な調査事例はきわめて数が少ないのが現状である。なぜならば、こうした調査には、出水の始めから終わりまで観測ポイントを離れることができない、降雨の予測が困難なので調査計画を立てにくい、土砂くずれや

¹⁾ 島根大学生物資源科学部地域環境工学講座
Course of Engineering on Regional Environment, Faculty of
Life and Environmental Science, Shimane University, 1060
Nishikawatsu, Matsue 690, Japan

落雷などの危険に遭遇することがある、といった困難な点があるためである。最近では採水開始時刻や採水間隔をあらかじめプログラムすることのできる自動採水器を用いることが多い。しかし、大規模な河川を対象とした場合には、大出水時に自動採水器が流される危険性があるため、自動採水器の適切な設置場所を選定することが困難な場合も多い。

河川の汚濁負荷量を議論する場合は、できる限り採水間隔の短い水質データを用いることが望まれるが、このような事情から、週1回程度の採水による水質データを基礎にする研究事例も多い(たとえば海老瀬, 1992; Keeney and DeLuca, 1993)。斐伊川では, Ishitobi (1988) によって1983年7月~1984年6月の1年間に約230回の水質測定が行われ、年間の負荷量の推定が行われているが、それ以後の詳細な資料は見当たらない。

筆者は、斐伊川において、1991年8月から週1回の頻度で水質調査を継続している。本論文では、斐伊川の2地点における1992年~1994年の3カ年における窒素、リン、CODの汚濁負荷流出量を推定した。

研究方法

1. 調査および分析方法

調査は、水質測定地点を斐伊川の中流部(木次地点・里熊大橋)と下流部(大津地点・神立橋)に設定し、原則として週1回の頻度で流水サンプルを採水した(図1)。木次地点の流域面積は451.0km²、大津地点の流域面積は911.4km²であった。

この2地点の河川流量は、建設省が管理している

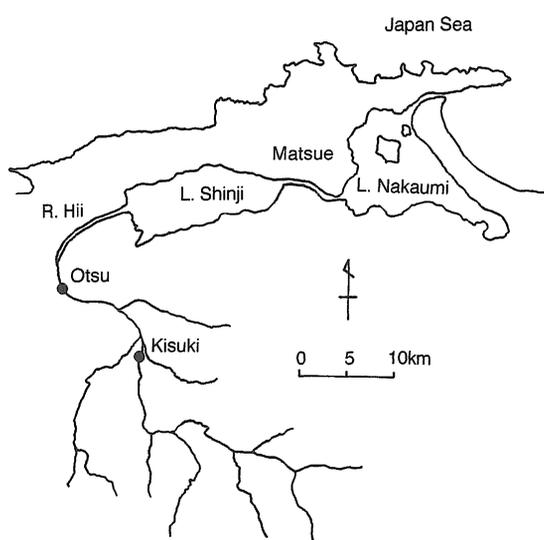


図1. 斐伊川水系と調査地点

Fig. 1. Water system of River Hii and water sampling points.

表1. 水質項目の分析方法

Table 1. Analytical methods for water quality constituents

Water Quality Constituent	Method
T-N	Nitrification by oxidation with potassium peroxodisulfate and ultraviolet rays adsorption method
NH ₄ -N	Indophenol method
NO ₃ -N	Ion chromatograph (SHIMAZU HIC-6A)
T-P	Decomposition to PO ₄ -P with potassium peroxodisulfate and method for PO ₄ -P
PO ₄ -P	Molybdate blue method
T-COD _{Mn}	Alkaline potassium permanganate method

水位局の公表データ(建設省河川局, 1994~1995)およびこれに公表予定のデータを用いた。斐伊川流域の降水量は、農業気象速報(島根県松江地方気象台, 1992~1994)に記載されている横田, 掛屋, 出雲の降水量を参考にした。

なお、河川流量データのうち、大津地点の1993年4月25日, 26日, 7月28日, 8月21~31日は欠測であったので、この期間の流量を大津地点よりも11.7km上流にある新伊萱(しんいがや)水位局の流量データをもとに補完した。すなわち、1993年4月~9月の大津地点の流量と新伊萱地点の流量の比の平均値(1.14)を、欠測期間の新伊萱の流量に乗じて、大津地点の流量とした。

水質の分析は、窒素、リン、CODなどについてJIS K0102(並木博ほか, 1986)および上水試験方法(厚生省生活衛生局水道環境部, 1985)に準拠して行った。表1にそれぞれの項目の測定方法を示した。なお、NO₃-NとT-CODは1993年3月から測定を開始した。

2. 負荷量の計算方法

河川における流出負荷量を算出するモデルにはいくつもの方法があるが、比較的多く用いられるものにL-Q式を用いる方法がある。これは、測定時の河川流量と流出負荷量を両対数軸上にプロットすると、比較的高い相関で回帰式が得られるので、この式を用いて水質を測定していない期間の負荷量を推定しようとするものである。このときの回帰式は(1)式ようになる。

$$L = a \cdot Q^b \quad (1)$$

ここに、L: 負荷量, Q: 流量, a, b: 定数。

この式は、負荷量が流量のみに依存する構造になっているので、必ずしも十分に現象を表していないという欠点がある。概して、T-N, T-P, T-CODなどの粒子性成分を含む水質項目の出水期間中の水質変化は、同一流量であっても、流量ピーク前の水質の方が流量ピーク後の水質よりも高い場合が多い。これは、流量ピーク前の流量増加時に、流域内

や河床に堆積した汚濁物質の多くが掃流されるためである。こうした現象を考慮して、流域内あるいは河道内の汚濁物質の堆積量を考えた(2)式(山口ほか, 1980), あるいはこの式を発展させた推定式が提案されている。

$$L = a \cdot Q^b \cdot S^c \quad (2)$$

ここに, S: 堆積汚濁物質量, c: 定数。

しかしながら, この式では新たに堆積汚濁物質量をうまく設定する必要があり, 不確定なパラメータが増加することになる。また, 週1回程度の採水が長期間にわたれば, その中に出水時の流量ピーク前の水質とピーク後の水質が含まれるので, (1)式を用いても高流量時の平均的な負荷量を推定できると考えることもできる。

このような考えにもとづき, 本論文ではまず, 1992年~1994年の3年間の153個の水質データと, 公表されている採水日の流量(日平均流量)を用いて(1)式を求めた。そして, この式に採水日以外の河川流量を代入することによって3年間の年間負荷量を推定した。

結果と考察

1. 水文量

本論文で対象とした1992年, 1993年, 1994年の年間降水量は, 横田, 掛谷, 出雲の3地点の平均値で, それぞれ1,534mm/y, 2,307mm/y, 1,308mm/yであった。このうち1993年の夏期は冷夏長雨といわれた期間であり, 低温と日照不足から後に米不足が全国的な問題となった。1993年の6~8月の月間降水量は, 3地点で大きな差異はなく, いずれの地点でも300mm/Mを越えていた(図4参照)。松江のこの期間の平年の降水量は120mm/M程度(6月=126.8mm/M, 7月=124.0mm/M, 8月=119.7mm/M)であるので, 1993年の月間降水量は, 平年の2.7~3倍程度であったことになる。1993年の最も大きな降水(日雨量)は6月29日の152(横田)~173(出雲)mm/dであった。

一方, 1994年の夏期は近年まれにみる渇水であり, 全国各地で水不足や水利転用が問題となった。1994年7月と8月の月間降水量は, 3地点の平均でそれぞれ34mm/M, 56mm/Mであった。7月の降水量を地点別にみると, 76(横田)mm/M, 14(掛谷)mm/M, 13(出雲)mm/Mで, 掛谷と出雲では松江の平年降水量の約10%に過ぎなかった。8月の降水量は3地点で大きな差異はみられなかった。

最新の流量年表(建設省河川局, 1995)によれば, 木次地点の1956年~1993年までの平均流量は,

22.08m³/sであるが, 本論文で対象とした1992年, 1993年, 1994年の平均流量は, それぞれ14.89m³/s, 26.08m³/s, 11.82m³/sであった。大津地点では, 同様に1957年~1992年までの平均流量は, 40.57m³/sであり, 1992年, 1993年, 1994年の平均流量は, それぞれ34.59m³/s, 52.55m³/s, 27.60m³/sであった。これらの流量は, それぞれ10.90億m³/y, 16.60億m³/y, 8.7億m³/yに相当していた(表4参照)。

日流量は, 3カ年に共通して2月~3月に高流量となる日が多かった(図4参照)。これは, 降雨のほか降雪と融雪の影響が大きいと思われた。大津地点の1992年, 1993年, 1994年の日平均流量の最大値は, それぞれ164.82m³/s, 763.01m³/s, 143.49m³/sであり, 降水量の多かった1993年の最大流量は, 他の年の5倍程度であった。1993年は, 日平均流量が200m³/sを越える日が10日あった。一方, 降水量の少なかった1994年は, 日平均流量が2m³/sに満たない日が19日あった。

2. 水質

図2に, 大津地点における窒素, リン, CODの水質の経時変化を, 測定を開始した1991年8月から示した。また, 1992年~1994年の3カ年の平均水質

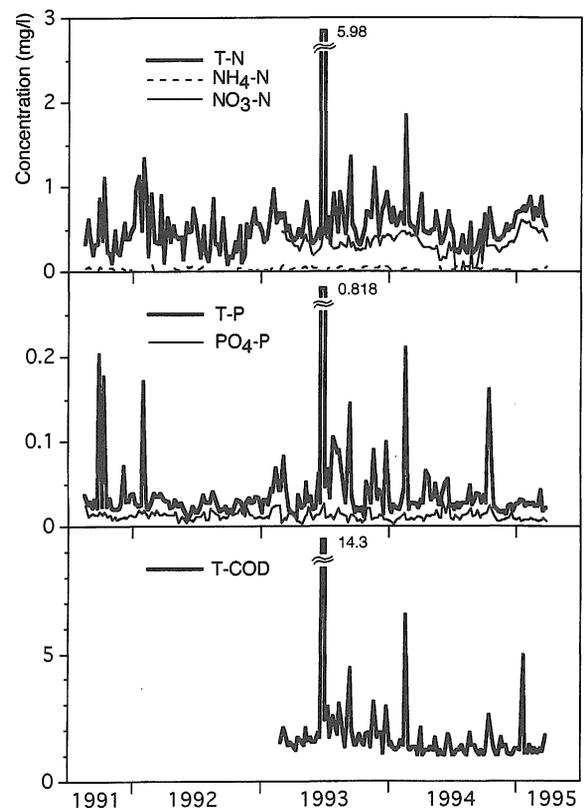


図2. 大津地点の水質変動

Fig. 2. Variation of water qualities at the Otsu point.

表2. 平均水質 (mg/l)
Table 2. Average concentrations (mg/l)

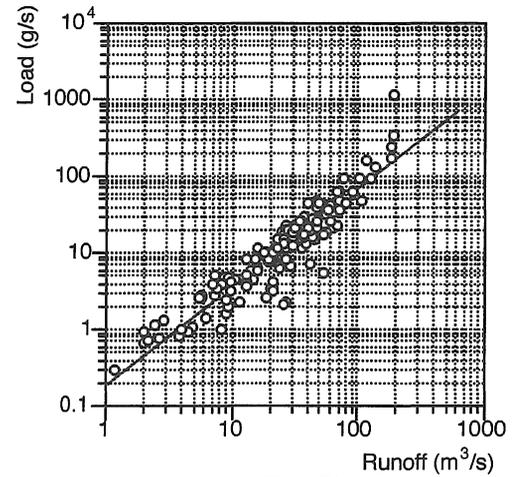
Site	Item	Year		
		1992	1993	1994
Kisuki	T-N	0.38	0.69	0.48
	NH ₄ -N	0.035	0.050	0.031
	NO ₃ -N	—	0.310	0.268
	T-P	0.026	0.056	0.034
	PO ₄ -P	0.012	0.010	0.010
	T-COD _{Mn}	—	2.6	1.4
Otsu	T-N	0.46	0.69	0.50
	NH ₄ -N	0.023	0.035	0.026
	NO ₃ -N	—	0.336	0.269
	T-P	0.028	0.057	0.034
	PO ₄ -P	0.013	0.012	0.012
	T-COD _{Mn}	—	2.1	1.4

(算術平均値)を表2に示した。

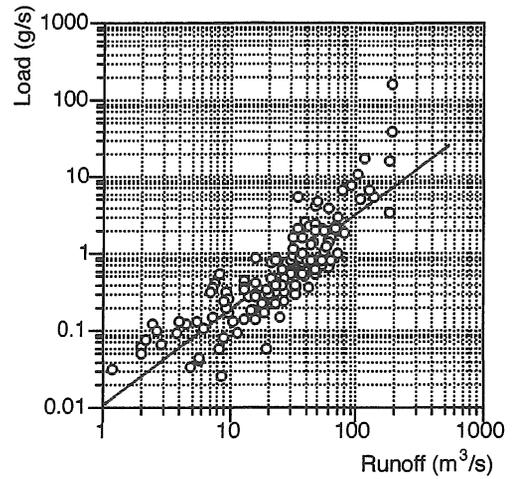
木次地点と大津地点の水質は、ほぼ同様の変動を示し、表2に示した平均水質では、大津地点の水質は、木次地点の水質よりもわずかに高いか同程度であるものが多かった。粒子性成分を含むT-N、T-P、T-CODの平均濃度は、降水量の多かった1993年の値が高い傾向にあった。溶存性の窒素のT-Nに占める割合は、NH₄-Nは10%以下と低かったが、NO₃-Nは約半分を占めていた。リンでは、PO₄-Pの平均濃度はいずれの年も0.01mg/l程度であった。

図2に示した大津地点のT-N、T-P、T-CODの水質は、降水時や2~3月頃の融雪による出水時に高くなる傾向にあった。特に1993年の夏期は、降水量、降雨期間ともに多かったため、全体的にこれらトータル成分の水質濃度は、ほかの2年よりも高くなった。T-N、T-P、T-CODの水質で最大となっているものは、1993年6月29日に採水したサンプルの水質であり、この日の日降水量は、前述の最大日降水量152(横田)~173(出雲)mm/dであった。木次地点には、橋脚が2m~3mの通称「潜り橋」があるが、1993年6月29日の採水時はこの橋のほとんどが水面下にあり、濁流の中、流木や枯れ枝などが多数この橋でせき止められていた。通常水質は2mm以上の懸濁物や固形物は対象にしないが、こうしたものは出水後も長く橋の近くに残留していた。

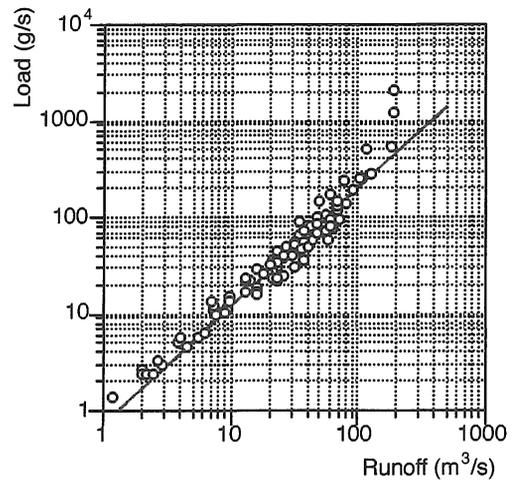
溶存性の物質の水質濃度は、出水時でも大きな濃度増加はみられず、また反対に、降水によって希釈されるわけでもなかった。渇水であった1994年の



(a) T-N (Otsu)
 $L = 0.189 * Q^{1.28} (r=0.93)$



(b) T-P (Otsu)
 $L = 0.0113 * Q^{1.22} (r=0.85)$



(c) T-COD (Otsu)
 $L = 0.819 * Q^{1.20} (r=0.97)$

図3. 負荷量と流量の両対数プロット
Fig. 3. Log-log plots of load and runoff.

表3. L-Q式
Table 3. L-Q equations

Site	Item	L - Q equation
Kisuki	T-N	$L = 0.188 * Q^{1.33}$ (r = 0.91)
	T-P	$L = 0.0118 * Q^{1.32}$ (r = 0.89)
	T-COD _{Mn}	$L = 0.800 * Q^{1.27}$ (r = 0.96)

Otsu	T-N	$L = 0.189 * Q^{1.28}$ (r = 0.93)
	T-P	$L = 0.0113 * Q^{1.22}$ (r = 0.85)
	T-COD _{Mn}	$L = 0.819 * Q^{1.20}$ (r = 0.97)

L: load (g/s), Q: runoff (m³/s), r: coefficient of correlation.

夏期にはNO₃-Nの濃度が低下し、測定限界以下になるサンプルもあった。これは、基底流出の減少により、地下水流出成分に含まれるNO₃-Nの減少によるものであると考えることもできたが判然としなかった。

3. 負荷量

1992年~1994年に測定した153個の水質データと採水日の流量から、(1)式で表されるL-Q式を求めた。図3に大津地点のT-N, T-P, T-CODの負荷量と流量の両対数プロットを示した。また、表3に木次地点と大津地点のこれらの水質項目に関するL-Q式を示した。

表3に示すように、木次地点、大津地点ともにL-Q式は、相関係数0.9前後で求めることができた。L-Q式のパラメータのうち、ベキ数bの値は図3の直線の傾きに相当するので、これは、両対数軸上での流量増加に対する負荷量の増加割合であり、河川流域の特性を表すものと理解できる(武田ほか, 1990; 奥川ほか, 1991)。斐伊川の場合は、大津地点のb値はいずれの水質項目も木次地点のb値よりも小さくなっていた。このことから、斐伊川下流域では河床勾配や流域の勾配が上流域よりも小さいため、大津地点における流量増加による負荷量の増加割合は、木次地点よりも少なかったと考えることができた。一方、L-Q式の係数a値は、低流量時(この場合は1m³/sの時)の負荷量の対数であるので、これは低流量時の水質に関連する数値と理解できるが、このa値は、木次地点と大津地点でほぼ同程度であった。ただし、ここで求めたL-Q式はあくまでも統計上の式であり、実際の流出現象や汚濁物質の流出機構については別途検討する必要あると考えられた。

このようにして求めたL-Q式と日流量より、1992年~1994年の日負荷量を推定した。図4では月平均の負荷量を降水量(横田, 掛谷, 出雲の平均)と流量とともに示した。また、表4では年間の負荷量を流

量とともに示した。

本論文では負荷量を(1)式によって推定したため、図4に示した月平均負荷量は、月平均流量の変動と同様な変化を示した。大津地点の月平均流量の最も多かった月は1993年7月であり、最も少なかった月は1994年7月であった。月平均流量の最大値は最小値の18.7倍に相当していた。これに対応する最大負荷量と最小負荷量の比はT-Nで40.1倍、T-Pで34.0倍、T-CODで32.3倍と、流量の比に比べてかなり大きかった。

年間の負荷量は、表4に示すように水文条件の影響を受けて年次変動が大きかった。降水量が多かった1993年の大津地点における年間負荷量は、

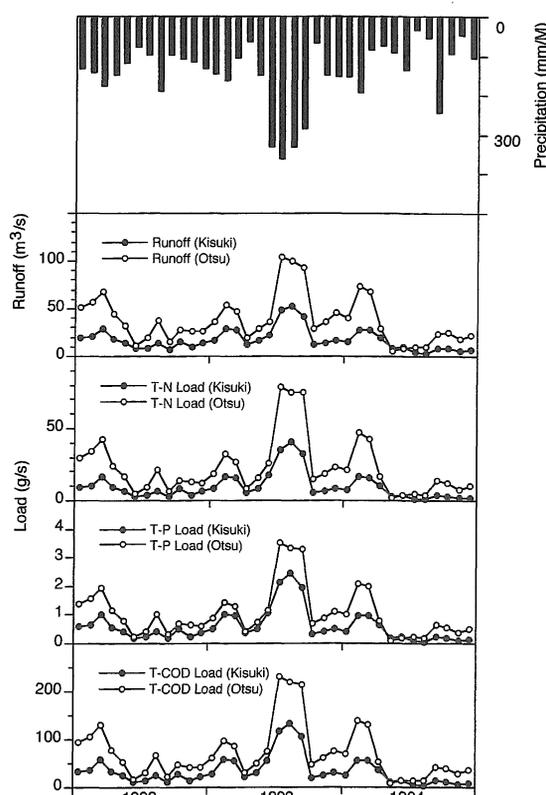


図4. 月平均負荷量と水水量

Fig. 4. Monthly average loads and hydrological amounts.

表4年間流量と推定負荷量
Table 4. Annual runoff and estimated loads

Site	Item		1992	1993	1994
Kisuki	Runoff	(*10 ⁶ m ³ /y)	470	822	373
	T-N Load	(ton/y)	231	532	183
	T-P Load	(ton/y)	14.1	32.1	11.1
	T-COD _{Mn} Load	(ton/y)	823	1,790	650

Otsu	Runoff	(*10 ⁶ m ³ /y)	1,090	1,660	870
	T-N Load	(ton/y)	601	1,090	483
	T-P Load	(ton/y)	28.5	49.6	22.8
	T-COD _{Mn} Load	(ton/y)	1,910	3,290	1,530

The annual average precipitation of Yokota, Kakeya and Izumo for 1992, 1993 and 1994 were 1,534mm, 2,307mm and 1,308mm respectively.

T-N=1,090ton/y, T-P=49.6ton/y, T-COD=3,290ton/yと推定され, これらはいずれも1994年の年間負荷量の2倍以上であった. 木次地点の負荷量は, 概ね大津地点の半分程度となるものが多かった.

Ishitobiら(1988)は, 1983年7月~1984年6月(年間平均流量は30.97m³/s)にわたり約230回の水質測定を行い, 大津地点での年間負荷量をT-N=857ton/y, T-P=95.6ton/yと推定している. これらの値は, T-N年間負荷量は表4で示した1992年~1994年の推定値の範囲内であったが, T-P年間負荷量は1993年の推定値の2倍近い値であった. これは, 1983年7月~1984年6月のT-PのL-Q式が,

$$L = 0.00562 \cdot Q^{1.53} \quad (3)$$

であるため, 特にこの式のベキ数1.53が, 表3で示したベキ数1.20よりもかなり大きいことが影響していると考えられた. 図3では, T-N, T-P, T-CODともに高流量時のプロットが, 回帰直線よりも上に位置しているものがあり, 特にT-Pでこの傾向が著しかった. また, 図3のプロットにおける河川流量の上限は200m³/s程度であるため, それよりも大きな流量時の負荷量の推定には, 表3に示したL-Q式ではやや問題があると思われた.

あ と が き

本論文では, 斐伊川の中流部(木次地点)と下流部(大津地点)で, 週1回の頻度で行った水質調査の結果をもとに, 1992年~1994年の3ヶ年の汚濁負荷流出量を推定した. 粒子性成分を含むT-N, T-P, T-CODの水質は, 降水量の多い年に高くなる傾向にあった. 年間負荷量は, 水文条件によって大きく変化し, 降水の多かった1993年の大津地点の負荷量は, T-N=1,090ton/y, T-P=49.6ton/y, T-COD=3,290ton/yと推定され, これは降水の少なかった1994年の2倍以上に相当していた. 木次地点の負荷量は, 概ね大津地点の半分程度となった. しかしながら, 高流量時では, 負荷量と流量の関係の把握が必ずしも十分でないかもしれないという問題点が考えられた. 斐伊川から宍道湖へ流出する汚濁負荷量は, 本論文で示したように水文条件によって大きく変化するため, 長期間にわたる水質資料の蓄積が必要であると考えられた.

なお, 本研究の一部は, 島根県環境生活部の依託を受けた. また, 現地調査や水質分析には島根大学生物資源科学部(旧農学部)農業水利工学研究室の卒論専攻生の協力を得た. 記して謝意を表します.

引 用 文 献

- 海老瀬潜一(1984)霞ヶ浦流入河川による送流入負荷量の評価, 国立公害研研報, **50**: 41-58.
- 海老瀬潜一(1992)河川の流出負荷量ポテンシャルモデルと汚濁負荷構造, 水環境学会誌, **15**: 887-901.
- Ishitobi, Y. et. al. (1988) Estimation of water quality and nutrient loads in the Hii River by semi-daily sampling, *Japanese J. Limnol.* **49**: 11-17.
- Keeney, D. R. and T. H. Deluca (1993) Des Moines river nitrate in relation to watershed agricultural practices: 1945 versus 1980s, *J. Environ. Qual.* **22**: 267-272.
- 建設省河川局(1994)流量年表(平成4年), 日本河川協会, 東京, 431pp.
- 建設省河川局(1995)流量年表(平成5年), 日本河川協会, 東京, 431pp.
- 厚生省生活衛生局水道環境部監修(1985)上水試験方法, 日本水道協会, 東京, 1019pp.
- 國松孝男(1986)河川による物質流送「琵琶湖集水域の現況と湖水への物質移動に関する総合研究」, 滋賀県琵琶湖研究所プロジェクト研究記録集, No.85 A2: 107-138.
- 國松孝男(1986)河川からの琵琶湖への汚濁負荷量の推定, オウミア, **16**: 1-2.
- 並木博編著(1986)詳説工場排水試験方法, 日本規格協会, 東京, 518pp.
- 落合久栄・菅井隆吉(1981)斐伊川における出水時の汚濁負荷流出について, 用水と廃水, **23**: 1317-1323.
- 奥川光治・宗宮功・大西行雄(1991)流域特性を考慮した流送能力型汚濁流出モデルの開発, 水質汚濁研究, **14**: 385-394.
- 島根県松江地方気象台(1992)島根県農業気象速報, No.1064-1099.
- 島根県松江地方気象台(1993)島根県農業気象速報, No.1100-1135.
- 島根県松江地方気象台(1994)島根県農業気象速報, No.1136-1171.
- 武田育郎・國松孝男・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, 農土論集, **147**: 79-85.
- 山口高志・吉川勝秀・輿石洋(1980)河川の水質・負荷量に関する水文学的研究, 土木論集, **293**: 49-63.