

河川水質縦断変化データに基づく 平水時浸透流域平均原単位の推定

EVALUATION OF UNIT LOAD AVERAGED OVER INFILTRATION BASIN UNDER LOW-FLOW CONDITIONS USING LONGITUDINAL VARIATIONS OF RIVER QUALITY

高橋友陽¹・二瓶泰雄²

Tomoaki TAKAHASHI and Yasuo NIHEI

¹学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学部研究科土木工学科専攻
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科(同上)

Unit load method has been widely used in evaluation of pollutant load from watershed to lake or inner bay. However this method has several issues for accurate evaluation of pollutant load. In this study, we present a new approach for evaluation of unit load averaged over infiltration basin under low-flow conditions using longitudinal variations of pollutant load and point source using GIS. For this purpose, we conducted water sampling and discharge measurement in Takasaki River, flowing into Lake Inba-numa. The results indicate that unit load averaged over infiltration basin of Takasaki River in spring and summer was quite lower than that in autumn and winter. The tendency of the seasonal variations of unit load is closely related to land use of plowed field.

Key Words: unit load method, nitrogen, infiltration basin, Lake Inba-numa, land use

1. はじめに

湖沼水質保全特別措置法¹⁾や水質総量規制²⁾では、流域から湖沼(もしくは内湾)へ流入するCOD・窒素N・リンPの負荷量が設定され、5年毎に見直されている。これらの負荷量算定のベースとなっているのが「原単位法」である^{3)~6)}。この原単位法では、単位時間及び単位面積(もしくは1人)あたりの汚濁負荷発生(排出)量である「原単位」を用いるものである。例えば、面源負荷の場合には、土地利用毎に異なる原単位が定められ、この原単位に土地利用毎の流域面積を掛けて和を取れば、流域全体の面源負荷量が得られ、原単位法は流域状況を反映した形で簡便に汚濁負荷評価を行い得る手法である。

この原単位法の汚濁負荷解析精度は、生活系や産業系から構成される点源負荷については概ね問題ない⁷⁾。一方、面源負荷の精度については、原単位の設定に大きく依存し、その原単位自体が地域毎に大きく異なる。例えば、図-1は第4期湖沼水質保全計画において各指定湖沼(印旛沼、手賀沼、霞ヶ浦、琵琶湖、児島湖、諏訪湖、釜房ダム、中海、宍道湖、野尻湖、八郎湖)で使用され

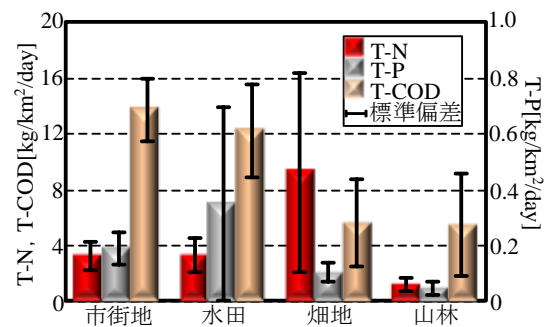


図-1 湖沼水質保全計画における指定湖沼で用いられる原単位の平均値と標準偏差

る原単位の平均値と標準偏差をまとめたものであり、水田や畑地における原単位のバラツキが大きいのが目立つ。また、全国のデータを見ると、最大2, 3オーダーの幅を持つことが報告されている⁸⁾。このような原単位のばらつきは、降雨状況等により原単位が非定常変化するという物理的要因と共に⁹⁾、原単位の調査方法¹⁰⁾が統一されていないことが挙げられる。それらに加えて、農地や山林などの“浸透域”では、卓越する地下浸透分の原単位を正確に計測することが困難であり、原単位の計

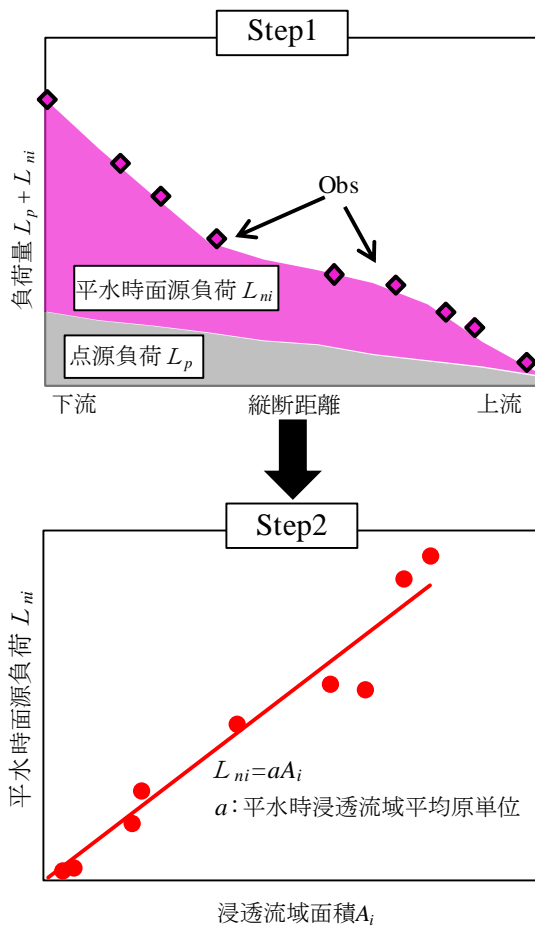


図-2 平水時浸透流域平均原単位推定法の概要

測・評価方法を抜本的に見直す必要がある。このような現状から、水環境学会ノンポイント汚染研究委員会では、近年「流域管理に向けた原単位のあり方とその方向性」に関するシンポジウムを行い、原単位法の再検討に乗り出している¹¹⁾。

本研究では、上記の原単位法の課題のうち農地や山林などからの地下浸透流出状況に着目し、河川水質縦断調査データと原単位法による点源負荷解析結果に基づいて、平水時の浸透流域における平均原単位を推定する手法を提案する。ここでは、赤松ら¹²⁾と同様に、地下水や河川水の窒素汚染が深刻化している千葉県印旛沼に流入する高崎川を対象とし、1年間にわたり季節ごとの水質縦断調査を実施している。また、別途行われている公共用水域水質データも解析し、平水時浸透流域平均原単位の季節変化も検討する。

2. 研究方法

(1) 平水時浸透流域平均原単位推定法の基本的枠組み

上述した「平水時浸透流域平均原単位」推定法の概要を図-2に示す。図中に示されているように、本推定法は、次の2つのStepから構成されている。まず、Step1では、

対象河川において、非降雨時（平水時）において上流から下流にわたる水質・流量の縦断調査を実施する。得られた結果に関して、各水質負荷量の縦断方向変化の図を作成する。そこには、各観測地点上流域からの点源負荷をGISにより作成し、そこで得られた結果もプロットする。

一般に汚濁負荷量 L は点源負荷 L_p と面源負荷 L_n で構成され⁴⁾、その面源負荷 L_n を出水時の表面流出成分（出水時面源負荷 L_{ns} ）と平水時の地下浸透流出成分（平水時面源負荷 L_{ni} ）に分けると、次式が与えられる。

$$L = L_p + L_{ns} + L_{ni} \quad (1)$$

これらの成分のうち、出水影響がない平水時の負荷量は点源負荷 L_p と平水時面源負荷 L_{ni} の和となる。この考えに基づくと、Step1で得られた各地点の水質負荷量から点源負荷の差は平水時面源負荷 L_{ni} と見なせる。

次に、Step2では、この平水時面源負荷 L_{ni} と各地点が抱える流域面積のうち浸透流域面積 A_i の相関図を作成する。ここでの浸透流域とは、山林と畑地、水田とする。この両者の相関式として、近似直線 $(L_{ni} = aA_i, a: 係数)$ を作成する。その傾き a は平水時の浸透流域の単位面積あたりに発生（排出）する汚濁負荷量を表しており、この a は平水時浸透流域平均原単位となる。

以上より、本手法では、水質負荷量（水質濃度と流量）の縦断調査データと点源負荷のGIS解析結果のみを用いるだけで、対象流域に含まれる浸透流域における平水時の平均原単位を算出することが可能であり、これまでの地先ごとの土地利用状況に合わせて局所的な調査結果から得られる原単位よりも、流域全体の実態に則した原単位を得られるものと期待できる。なお、本手法の原単位推定精度は、点源負荷の算定に大きく依存しているが、前述したように、著者らの研究⁷⁾では、原単位法による点源負荷算定精度は概ね良好であることが確認されているので、この課題は本手法による原単位推定の支障にはならないものと考えられる。

(2) 現地観測と水質分析の概要

本研究の観測サイトは、図-3に示すように、印旛沼流入河川の中で最も大きい鹿島川の支川である高崎川である。高崎川の全長は6.1km、流域面積は85.3km²である。同図に示すように、高崎川の土地利用としては、畑地や山林が多く、特に本川・支川の上部の流域はほぼ畑地で覆われている。このような農地河川である高崎川は、洪水氾濫防止のため、三面コンクリート張りの護岸整備が行われている。高崎川全体の土地利用は、山林23%、水田8%、畑地33%、市街地34%、その他2%である。

この高崎川において、水質・流量の縦断調査を実施し

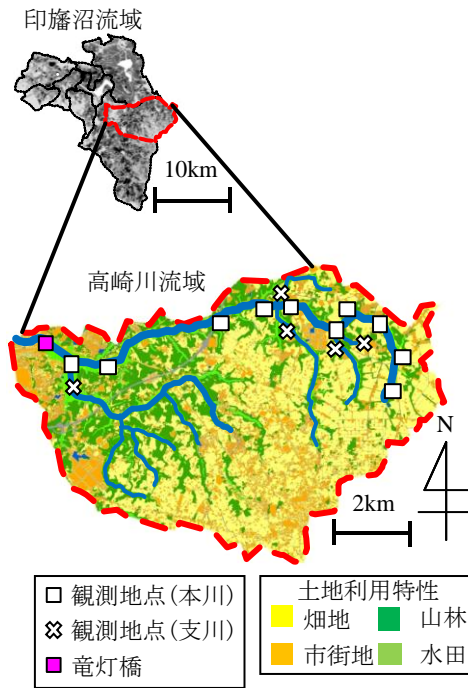


図-3 本研究の観測サイトと土地利用(2007年)

た. 観測地点としては, 本川に10地点(図中□印), 支川に5地点(図中×印)である. これらの地点において, 河川水の採取と流量測定を実施した. 流量計測としては, 各断面を10程度の区分断面に分け, 水深とポータブル式電磁流速計(PMV-3, 株式会社エヌケーエス製)による流速の計測を行っている. 原単位の季節変化を把握するために, 観測日は夏季(2010/8/12)と秋季(同年11/22), 冬季(2011/2/26), 春季(同年5/27)である.

採取された河川水の分析項目としては, T-N, D-N, $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, T-P, D-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, T-COD, D-CODとする(T-とD-は全成分と溶存態成分を表す). この全成分と溶存態成分の差を取ることで, 懸濁態成分Pを算出している. 分析法としては, 窒素NとリンPについては, オートアナライザー(swAAt, 株式会社BLTEC製)により測定し, CODには過マンガン酸カリウム法を用いた. なお, 本論文では, 窒素Nのみ記述する.

また, 別途, 詳細に原単位を検討するために, 高崎川下流部の竜灯橋(鹿島川合流点から1.4km)における公共用水域水質データについて, 2005年から2010年の6年分を収集した. 本調査結果と公共用水域水質データを合わせて, 原単位について調べる.

(3) 点源負荷算出方法

次に高崎川流域における点源負荷を求めるために, 湯浅ら¹³⁾によってまとめられた印旛沼流域の100mメッシュの点源負荷データを用いる. その後, GIS(ArcView9.3, ESRI社)により, 観測地点の集水域を求め, その集水域

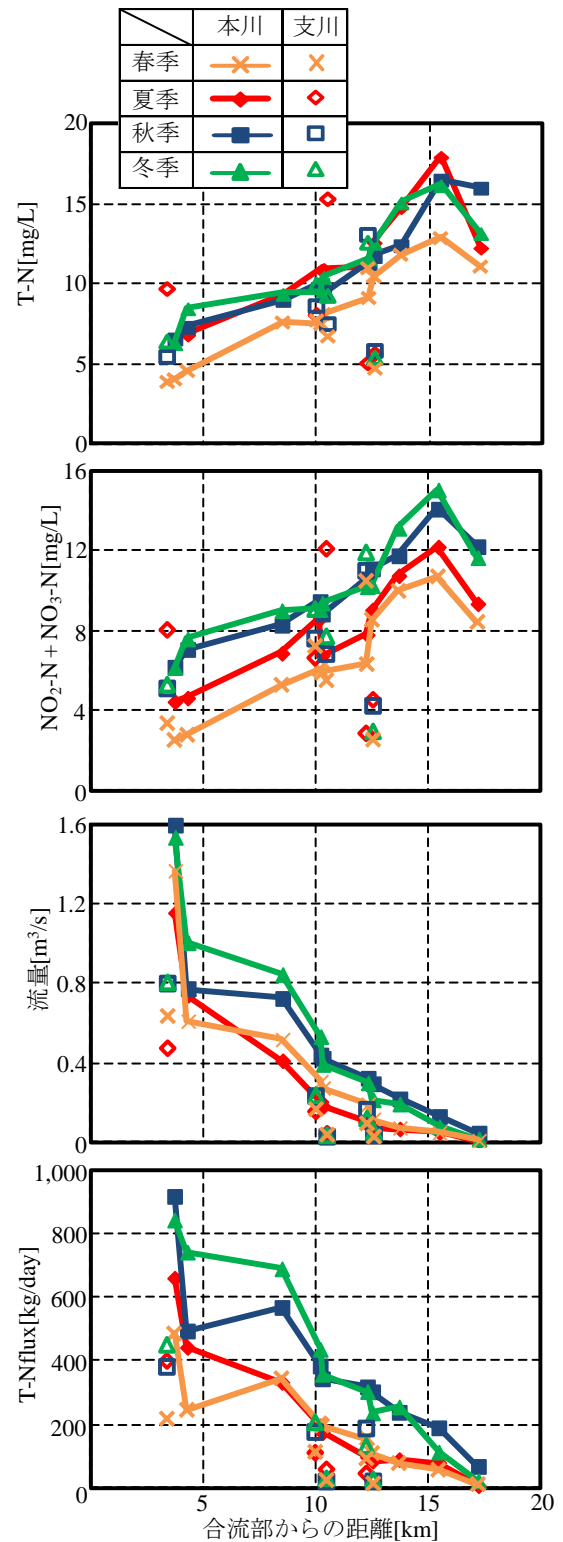


図-4 平水時高崎川におけるT-N, $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$, 流量, T-N fluxの縦断変化(2010/8/12, 11/22, 2011/2/26, 5/27)

内にある点源負荷データを収集し, 各観測地点の点源負荷としている. また, 土地利用状況は, 2007年版の国土数値情報をダウンロードして, 各観測地点における流域面積と土地利用状況(山林, 水田, 畑地, 市街地)を算出する.

3. 観測結果及び考察

(1) 窒素濃度・負荷量の縦断変化と季節変化

まず、高崎川における水質環境の縦断変化や季節変化を把握するために、T-N、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 、流量 Q 、T-N fluxの縦断方向変化を図-4に示す。ここでは、水質調査を行った夏季(2010/8/12)と秋季(同年11/22)、冬季(2011/2/26)、春季(同年5/27)の結果が表示されている。また、計測された本川と支川の全データが記載されており、本川では線で、支川を点で表している。

これより、T-Nに関しては、季節によらず、基本的には上流部が高く、下流部で低くなっている。その濃度レベルとしては、上流部は春季の結果を除き、 15mg/L を越える地点が存在している。また、支川の結果に関しては、基本的には本川の結果を下回る濃度となっている。

次に、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ についても、T-Nと同じ縦断変化パターンが見られる。また、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ の季節変化としては、秋季、冬季の値が春季、夏季よりも高くなっており、T-Nよりも明確な季節変化が現れている。また、T-Nの大部分は $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ となっているが、その割合は夏季が他の季節と比べて相対的に小さくなっている。

流量の縦断変化としては、緩やかに増加すると共に、支川の合流後には大きく増加している。この様子の季節変化としては、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ と同様に、秋季と冬季が大きく、春季と夏季が小さくなっている。一般には、台風や降雨の影響により、夏季に河川流量が大きくなり、冬季に小さくなる傾向があるが、高崎川ではこれらの影響よりも、水田における水利用や地下水の流入¹⁴⁾の寄与が大きいためであると考えられる。

最後に、T-N fluxの縦断変化については、全体的には、秋季や冬季のフラックスは、春季と夏季よりも大きくなっており、これには、上述した流量やT-Nの季節変化の影響を受けている(T-Nの夏季の結果を除く)。本観測範囲の最下流地点では、秋季におけるT-N fluxが 917kg/day となるのに対して、春季では 484kg/day となっており、最大値と最小値を比べると約2倍の負荷量の差が出ており、明確な季節変化が生じていることが分かる。

本観測結果では、およそ3ヶ月ごとのデータしかなく、季節変化を把握するのに十分ではない可能性がある。そこで、高崎川下流部(竜灯橋)において得られている公共用水域水質データによるT-N fluxの経月変化を図-5に示す。ここでは、データ欠測が見られた2007年を除く5年分の結果と月毎に平均した結果を表示している。これより、T-N fluxは5月から9月において小さく、それ以外の10月~4月にかけて大きくなっている。このような季節変化は、本調査結果と符合している。このような季節変

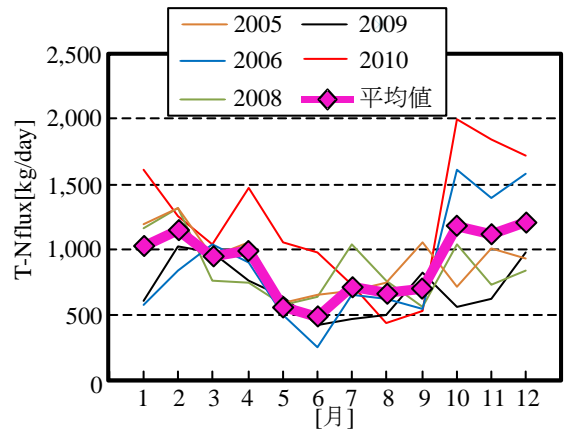


図-5 高崎川下流地点(竜灯橋)におけるT-N fluxの経月変化(公共用水域データの解析結果)

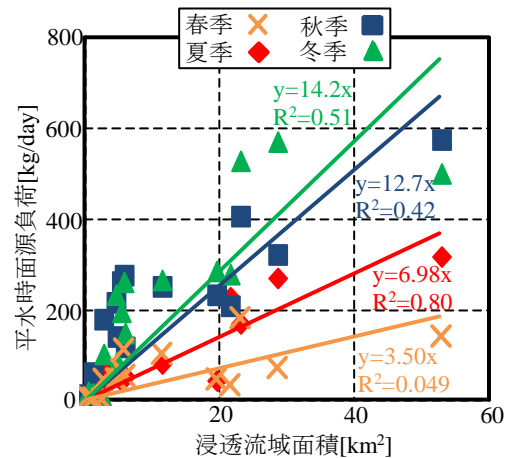


図-6 平水時面源負荷と浸透流域面積の相関関係

化の要因を把握するために、T-N flux算出に用いるT-Nと流量の季節変化を調べた結果(図省略)、流量に関しては明確な季節変化は見られなかったものの、T-Nの濃度値はT-N fluxと同様な季節変化を示しており、図-5の季節変化は窒素濃度に由来していることが確認された。

(2) 平水時浸透流域平均原単位の推定

上述したT-N 負荷の実測値から各地点の点源負荷を差し引いたもの(=平水時面源負荷 L_{ni})と各地点の浸透流域面積 A_i (=山林と畑地、水田面積の和)の相関図を図-6に示す。図中には、全ての季節のデータが表示されており、各季節に対する近似式も合わせて図示されている。これを見ると、全般的には、浸透流域面積とともにT-N負荷量が増加する右肩上がりになっている。また、その傾きは、秋季や冬季が大きく、春季が最も小さくなっており、前述したT-N fluxの季節変化と対応した結果となっている。

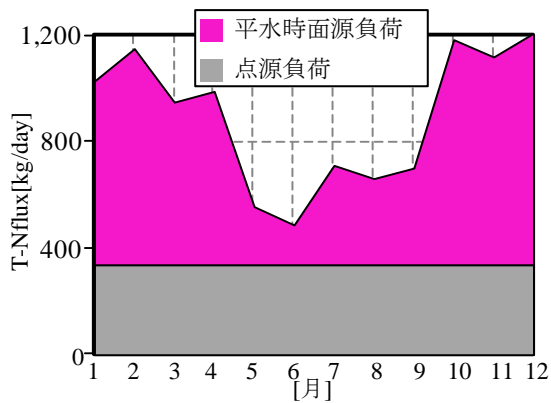


図-7 公共用水域データ（高崎川竜灯橋）に基づくT-N fluxの平年値に対する点源負荷と平水時面源負荷の割合

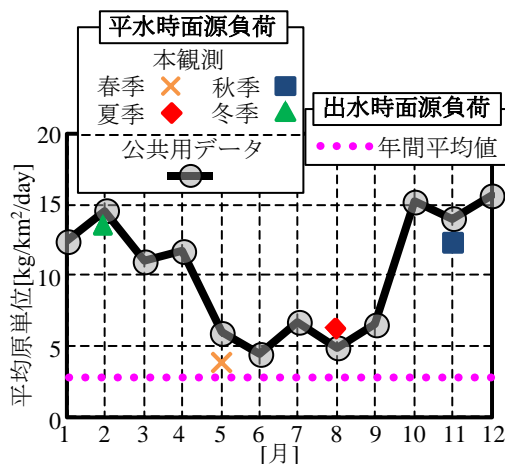


図-8 公共用水域データ（竜灯橋）及び本観測値による平水時浸透流域平均原単位の月別変化（T-N、図中には出水時面源負荷原単位も合わせて示す）

前述したように、図中に示されている近似直線の傾きは平水時浸透流域平均の原単位に相当している。この近似式より、夏季、秋季、冬季、春季における平水時浸透流域平均原単位は、それぞれ、6.98、12.7、14.2、3.50kg/km²/dayとなっており、原単位で見ると、季節変化により春季と冬季で約4倍の開きがあることが分かる。また、全データの単純平均（=年平均）をとると、年平均の原単位は9.35kg/km²/dayとなっている。

そこで、このような平水時浸透流域平均原単位の季節変化を検討するために、図-5で示した公共用水域水質データ（下流部・竜灯橋）より、同地点におけるT-N負荷量に対する点源負荷と平水時面源負荷の内訳を図-7に示す。ここでは、竜灯橋地点において算出された点源負荷は時間的に一定としているため、T-N負荷量の季節変化は全て平水時面源負荷に起因している。このように、平水時面源負荷は秋・冬に高く、春・夏に低くなる、という明確な季節変化が見られる。

竜灯橋地点における平水時面源負荷を浸透流域面積で除すことにより得られる平水時浸透流域平均原単位の経

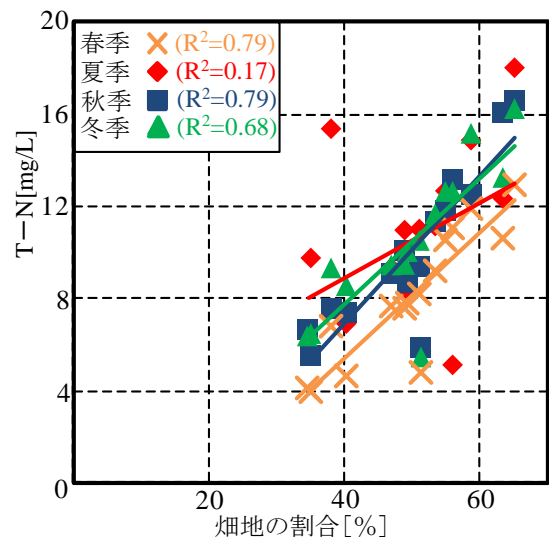


図-9 各観測地点におけるT-Nと流域の畑地率の相関関係

月変化を図-8に示す。図中には、竜灯橋における公共用水域データから得られたもの及び本調査結果から推定された平水時浸透流域平均原単位を表示している。また、比較のために、出水時面源負荷の原単位も図示している。この出水時面源負荷については、竜灯橋における流量の時系列データ及び高崎川におけるT-Nに関するL-Q式¹⁵⁾から出水時（流量 $Q>5\text{m}^3/\text{s}$ ）におけるT-N負荷量の年間値を算出し、それから時間と流域面積で除したものを出水時面源負荷原単位の年間平均値として与えている。これより、公共用水域データから得られた平水時浸透流域平均原単位は5から15kg/km²/dayと大きく変化している。また、基本的な季節変化パターンは、図-5と同じである。これらの原単位の季節変化は、流域土地利用から類推すると、水田の灌漑用水として利用、脱窒効果や、灌漑期・非灌漑期の差、畑地の施肥時期と収穫時期という影響が及ぼされている可能性が考えられる。また、公共用水域水質データによる原単位は、本観測結果から得られた原単位と年間平均値、季節変化共に概ね一致しており、本推定法の有効性が確認された。さらに、これらの平水時面源負荷原単位は出水時原単位よりも大きくなっており、本対象流域では、地下浸透経路の平水時面源負荷が顕著であることが明らかとなった。

(3) 平水時面源負荷に対する土地利用の影響

平水時面源負荷や平水時浸透流域平均原単位に対する土地利用の影響を調べるために、本観測により得られたT-Nと各観測地点における集水域中の畑地率に関する相関図を図-9に示す。ここでも季節別に色分けすると共に、直線近似したときの決定係数 R^2 も合わせて表示している。これより、T-Nと畑地の割合には明確な正の相関があり、これは赤松ら¹²⁾の結果と一致している。このように、高

表-1 土地利用別の平水時浸透流域平均原単位
(単位: kg/km²/day)

	山林	水田	畑地
春季	1.1	1.5	5.3
夏季	1.2	2.1	11.3
秋季	2.4	3.4	22.8
冬季	1.4	3.7	23.8

崎川流域では、平水時面源負荷のT-N負荷としては、畑地が主な汚染源となっていることが分かる。

そこで、上記のことを定量的に検討するために、平水時面源負荷 L_{ni} と浸透流域の土地利用別面積（山林 A_1 、水田 A_2 、畑地 A_3 ）の間における重回帰分析を、以下の式 (2) を用いて実施する。

$$L_{ni} = x_1 A_1 + x_2 A_2 + x_3 A_3 \quad (2)$$

ここで、 x_1 、 x_2 、 x_3 は係数であり、それぞれ山林、水田、畑地における平水時浸透流域平均原単位に相当している。これらの係数の求め方としては、 x_1 、 x_2 を0.1～5.0、 x_3 を0.1～50.0の間をそれぞれ0.1[kg/km²/day]ずつ変化させ、観測値との相対誤差のRMS値が微小になるか、また、得られた原単位より浸透流域平均原単位を求め、観測値や公共用データとの一致を考慮した、以上2点で決定されている。この結果により得られた係数 x_1 、 x_2 、 x_3 を表-1に示す。このように、原単位は畑地>水田>山林の順に大きくなることが分かる。特に、畑地における原単位が大きくなっていると共に、その季節変化が顕著であり、その様子はこれまでの平水時面源負荷の季節変化と符合している。

対象流域である高崎川流域の農作物の約90%は10～11月に収穫されている¹⁵⁾。農作物は、一般には施肥中の栄養塩の5割を吸収するため¹⁶⁾、収穫期を終えて農作物が吸収するはずの窒素成分が流出したために、秋季や冬季において、畑地起源の平水時面源負荷が高くなったものと推察される。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は下記のとおりである。

- 1) 水質・流量の縦断調査データと点源負荷解析結果のみから、従来では困難であった平水時の浸透流域にわたる平均原単位に関する推定法を提示すると共に、本推定法を高崎川流域に適用した。
- 2) 高崎川におけるT-N負荷量としては、夏季に低く冬季に高いという季節変化が見られた。これと連動して、T-N負荷量に関する平水時浸透流域平均原単位は3.5～14.2kg/km²/dayと大きく変動しており、年間平均値

は9.35kg/km²/dayとなった。

- 3) 上記の結果と公共用水域水質データから求められる平水時浸透流域平均原単位は概ね一致しており、本推定法の有効性が確認された。また、土地利用別に平水時原単位を算出した結果、畑地の原単位が卓越しており、この高崎川流域における窒素汚染には畑地からの地下水浸透分が大きく影響していることが示唆された。

謝辞：現地観測及びデータ解析に対して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。点源負荷データは千葉県及びパシフィックコンサルタンツより提供して頂いた。本研究の一部は、下水道振興基金研究助成金（研究代表者：二瓶泰雄）によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) (社)日本水環境学会：日本の水環境行政，ぎょうせい出版，1999。
- 2) 中央環境審議会：第6次水質総量規制の在り方について（答申），21p，2005。
- 3) 山田淳：面源負荷—その現状と課題—，環境技術，Vol.29，No.7，pp.496-501，2000。
- 4) 国松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.1-266，1989。
- 5) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版，pp.1-214，1990。
- 6) A. S. Donigian and W. C. Huber: Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-urban Areas, Athens, GA: Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, pp.1-107, 1991。
- 7) 二瓶泰雄・服部裕司・小久保武・大竹野歩：GISを用いた手賀沼流入河川の汚濁負荷解析，水工学論文集，Vol.48，pp.1459-1464，2004。
- 8) 国土環境株：非特定汚染源対策計画検討調査，2004。
- 9) 吉田拓司，二瓶泰雄：屋根面堆積負荷に関する非定常原単位モデルの提案，水工学論文集，Vol.52，pp.271-276，2008。
- 10) 環境庁水質保全局水質管理課：非特定汚染源負荷調査マニュアル，pp.23-106，1990。
- 11) 例えば，大久保卓也，佐藤祐一：滋賀県における森林，水田，市街地の原単位検討調査結果，日本水環境学会シンポジウム講演集，Vol.14，pp.229-230，2011。
- 12) 赤松良久，二瓶泰雄，長谷川定，林薫，湯浅岳史，上原浩，小倉久子：印旛沼流入河川における窒素汚染の実態とその要因，河川技術論文集，Vol.16，pp.311-316，2010。
- 13) 湯浅岳史，吉田正彦，上原浩，佐々木亨：GISを用いた汚濁負荷量の算定と流域浄化機能の評価，水環境学会年次講演会，2005。
- 14) 原田渉，二瓶泰雄，佐藤和博：地下水が農村河川の窒素汚染に及ぼす影響，土木学会年次学術講演会講演要旨集，Vol.66，pp.179-180，2011。
- 15) いんばぬま情報広場：<http://inba-numa.com/what/syoukai/inbanumatowa>。
- 16) 山崎耕宇，杉山達夫，高橋英一，茅野充男，但野利秋，麻生昇平：植物栄養・肥料学，壮光社印刷，1993

(2011. 9. 30受付)