

都市内小河川流域での晴天期全窒素・全リン流出特性と 土地利用分布との関係

Influence of the land use in a small urban watershed on the runoff process of total nitrogen and total phosphorus

篠田成郎* ・ 早藤貴之** ・ 都築克紀*** ・ 湯浅 晶****

Seirou SHINODA, Takayuki HAYAFUJI, Katsunori TSUDUKI, Akira YUASA

1. 緒言

都市内の中小河川はそこに暮らす人々にとって最も身近な自然のほずであるが、悪臭の漂う排水路としてのイメージを払拭できない河川が未だに多く存在するように思われる。これは、排水基準の設定などにより点源からの汚濁負荷量は抑制可能となっても、面源に対する制御が容易ではないことに加え、最近の下水道整備の進展に伴い、流域面積の小さな都市内中小河川の流量が低下し汚濁物質濃度が高くなってしまったためと考えられる。地域住民や子どもたちが親しみを持てるような河川環境を創出するためには、治水・利水面での安全性の確保はもとより、流域内の人間活動と汚濁負荷物質の収支との関係を適正化することが必要になる。

人間活動状況などの空間的情報を考慮して汚濁負荷流出過程をモデル化する扱いには、土地利用別汚濁負荷流出タンクモデル¹⁾、メッシュモデル²⁾、米国環境庁(EPA)のHSPF^{3),4)}などのいくつかの検討例がある。これらのモデルでは、土地利用分布に代表される人間活動状況は空間分布種別に対応した負荷原単位を入力することにより評価される。しかしながら、生活排水や代表的作物の耕地流出水などの一般的な事例を除き、ほとんどの場合、こうした負荷原単位を精度良く与えることは容易ではない。とくに、下水道が整備され、点源よりも面源からの流出が支配的となる都市域での負荷原単位は土地利用種別ごとに様々であり、一般的な原単位推定法から導かれた値の精度には疑問が残る。

本研究では、流域に住む人々が通常の川遊びをできる日、すなわち晴天期における清浄な河川水を確保するためにはどのような都市構造を整備することが重要なのかという観点から、岐阜市南部市街地を流下する荒田川流域(木曽川水系長良川支川；流域面積17km²；下水道整備率100%)を対象として、人間活動を代表する情報である土地利用分布と河川水中の全窒素・全リン負荷量との関係を明らかにすることを目的としている。とくに、汚濁負荷量の排出・流下過程を簡便な流出モデルで表現することにより、土地利用別排出原単位を簡単に推定できる方法を提案するとともに、土地利用配置状況が流出現象に及ぼす影響について検討する。

2. 対象流域内の土地利用分布と現地観測

2.1 観測地点と観測結果

図-1は、観測対象とした荒田川流域の位置、流域界および測点の配置状況を示したものである。図中、○印で示される測点P.1~P.9が水文・水質観測地点であり、自動採水装置や水位計による連続測定および1日1回のマニュアル採水が行われた。また、測点P.9は荒田川が本川(長良川)に合流する直前に位置しており、荒田川流域の最下流点となっている。なお、この地点には、岐阜市衛生部の管理する荒田川水質自動観測所があり、流量や水質の時間データが計測されているが、測点P.8とP.9の間の途中流入がほとんど存在しないため、補助的な測点として扱うことにする。一方、□印で示される測点P.7, P.11, P.12には雨量計および雨水採取装置が設置されているほか、測点P.10では岐阜地方気象台での各種気象データを利用することとしている。

キーワード：汚濁負荷流出モデル、土地利用別原単位推定、晴天期流出特性、都市内河川水質、土地利用分布

* 岐阜大学流域環境研究センター 助教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1, shinoda@green.gifu-u.ac.jp)

** (財)林業土木コンサルタンツ

*** 岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程

**** 岐阜大学流域環境研究センター 教授

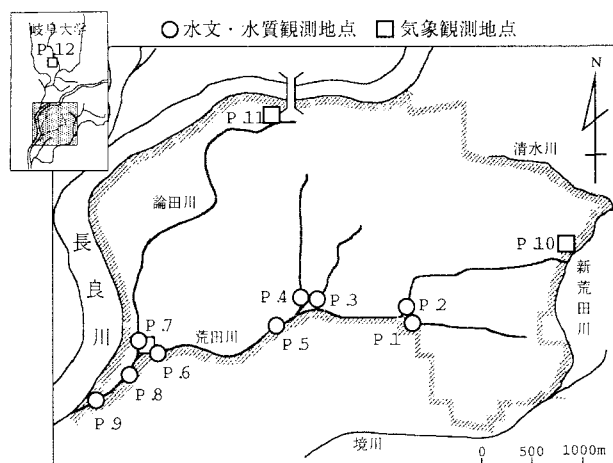


図-1 観測対象流域と観測地点

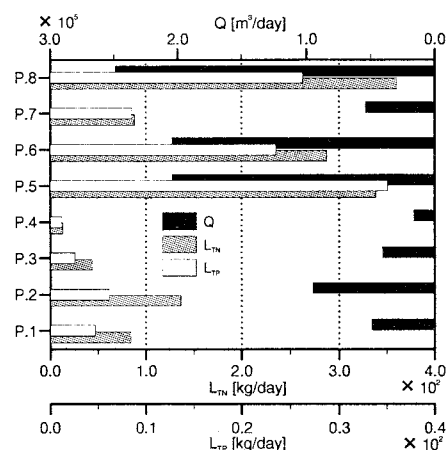


図-2 観測地点ごとの日平均流量 Q 、日平均全窒素負荷量 L_{TN} および日平均全リン負荷量 L_{TP}

こうした測点での現地観測を1997年8月20日～9月10日の21日間にわたり実施した。観測期間中には、9月6日～8日に30mm/h前後の雨が降ったが、それ以外の期間では最高気温が30℃を越す晴天が続き、流域内からの汚濁負荷流出は比較的定常な状態であった。なお、8月23日にも降雨が観測されているが、総雨量はわずか2mmであったことに加え、この雨に対する先行晴天日が10日間と長期であったため、地面を湿らすにも至らなかった。これらのことより、晴天期の続いた8月20日～9月5日の16日間を解析対象として扱うこととする。各測点ごとの流量 Q 、全窒素負荷量 L_{TN} および全リン負荷量 L_{TP} を解析対象期間内における1日当たりの平均値として示すと図-2のようになる。以下では、こうした日平均値を流出量として扱うものとする。

2.2 流路網と集水域界の推定

都市域における水路(雨水排水路)は高度に整備されており、大小さまざまな水路が網の目状に入り組んでいるため、流路網と流下方向を正確に決定することは極めて難しい。一方、降雨流出の存在しない晴天期における流出水は、一般家庭や事業所からの排水(下水道が完備されているため、庭への散水などによる)や水田からの浸出水によって構成されているため、降雨時とは異なった流下経路を示すことも十分考えられる。そこで、住宅地図(ゼンリン発行、1997年版)に記載されている水路および岐阜市河川・水路図に基づき詳細な水路図を作成するとともに、国土地理院50mメッシュ数値標高データにより流下方向の概略を把握した。次に、この結果を手に現地踏査を行い、観測期間中における水路中の水および流れの有無と方向などを詳細に調査した。その結果、道路側溝や暗渠水路などの中には流水が認められない箇所が多く存在するものの、大部分の50mメッシュ(3次メッシュの1/20のサイズ；南北45.7m、東西54.5m)に関して、1つのメッシュ内に少なくとも1本の流水の存在が確認できた。そこで、こうした現実的な流れをメッシュ間の流水方向として表現した流路網を作成すると同時に、各測点を集水点とする集水域界を決定した。

2.3 土地利用分布のメッシュデータ化

流域内の土地利用分布データとして国土地理院発行の1/10細分区画土地利用データを利用可能であるが、このデータが古いために実状と合わない部分が多く存在することに加え、約100mのメッシュサイズでは上述の流路網や土地利用状況を正確に表現することができないとの判断から、次の手順によりメッシュ型土地利用データを新たに作成し直すことにした。まず、前述の住宅地図と現地踏査に基づき、対象流域内の土地利用区分を水田(略称P)、畑地(略称F)、草地(略称G；荒れ地、空き地、公園、グラウンドなど)、家屋・事務所(略称H)、工場(略称W)、寺社(略称T)、舗装面(略称A；道路や駐車場)、森林(略称V；寺社・公園内の樹体植生部を含む)および河川(略称R)の9種類に分け、ラスタ型データとして整備する。ついで、50mメッシュ数値標高データと同一のメッシュ内において最大面積となる土地利用区分を当該メッシュでの代表土地利用種別として設定する。

図-3はこうして得られるメッシュ型土地利用分布を表したものであり、図中の土地利用区分には上述の略称が用いられている。なお、図中には、参考までに観測地点ごとの集水域界を細線で記入してある。また、各測点を集水点とする集水域ごとの面積および土地利用別面積割合を図-4に示す。これらの図より、対象流域内では、家屋・事務所(H)、水田(P)および舗装面(A)の占める面積割合が卓越していることがわかる。

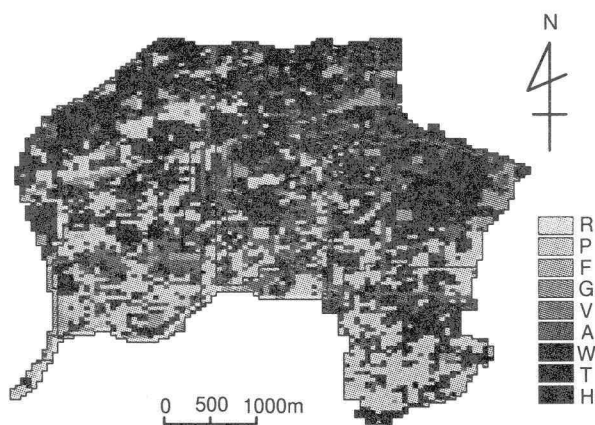


図-3 対象流域内の土地利用分布と観測地点ごとの集水域界

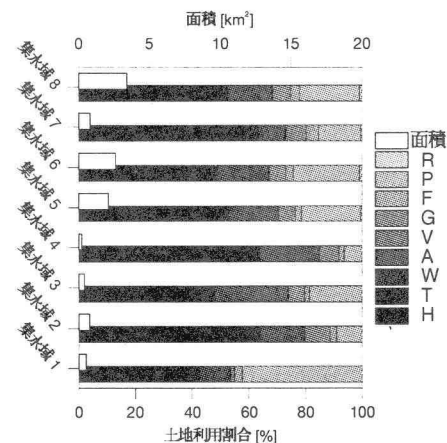


図-4 観測地点ごとの集水域面積と土地利用別面積割合

3. 土地利用別排出原単位の推定

3.1 排出・流下過程のモデル式

晴天期における土地利用別の流出特性を定量的に評価するために、土地利用ごとの排出負荷原単位および流下に伴う負荷量の変化率を推定できる簡便な流出モデルを考えてみる。なお、全窒素負荷量と全リン負荷量に加え、流量についても流出モデルの対象とするために、以下では、流量、全窒素負荷量および全リン負荷量の3つの物質質量に関して、発生源から河道（小規模の水路を含む）へ排出される量を排出量、排出物質が河道内を流下してある地点（ここでは観測地点）に達した量を流下量と呼ぶことにする。

図-5 は、排出・流下過程における物質質量の空間的変化を模式的に表したものである。まず、集水域内のある地点において Φ_0 の負荷原単位が存在していたとする。このとき、その地点での排出率を α とすれば、排出原単位 Ψ は $\Psi = \alpha\Phi_0$ として求められる。河道内に流入した Ψ は、流下過程における自然の浄化作用や沈降・堆積現象のために、流下とともに徐々に減少する。物質が単位長さ（距離）を流下することによる物質質量の変化率を β とすると、単位距離流下後の物質質量、すなわち流下量 Φ は $\Phi = \beta\Psi = \beta\alpha\Phi_0$ として表される。流下過程での物質質量変化率 β が空間的に一定と仮定し、物質の排出地点と観測地点（集水点）との間の距離を l とすれば、距離 l の河道内流下中における物質質量の変化率は β^l となるので、結局観測地点での流下量 Φ は次式から求められることになる。

$$\Phi = \beta^l \Psi = \beta^l \alpha \Phi_0 \quad (1)$$

なお、物質質量変化率 β は厳密には空間的に一定とは扱えないであろうが、適用対象としているような都市内水路では、ほとんどの場合3面コンクリート張りであることに加え、水路勾配もゼロに近いと考えられるため、あながち無謀な仮定ではないと判断される。今回の荒田川流域内では、全ての水路がほぼゼロ勾配の3面コンクリート張りであり、水路床での低泥堆積状況や水草繁茂状況もほぼ同一であった。

式(1)は特定の地点からの流下量を表したものであり、実際には、集水域内の各所からの流下量の積分として観測流下量を表現することが必要になる。図-6 は、ある集水域の第 m メッシュからの流下経路を模式的に示したものである。この流下経路長を l_m と表記するとともに、式(1)を第 m メッシュからの流下量 Φ_m とすれば、集水域全体の流下量 Φ は次のように表されることになる。

$$\Phi = \sum_m \Phi_m = \sum_m \beta^{l_m} \Psi_m \quad (2)$$

ここに、 M は対象集水域内のメッシュ総数を表す。さらに、式(1)を土地利用分布に対応した表現とするために、土地利用種別 n に関する排出原単位を Ψ_n として書き直すと次式となる。

$$\Phi = \sum_n \left(\beta^{l_{1|n}} + \beta^{l_{2|n}} + \dots + \beta^{l_{m|n}} + \dots + \beta^{l_{M|n}} \right) \Psi_n = \sum_n \left(\sum_{m|n} \beta^{l_{m|n}} \right) \Psi_n \quad (3)$$

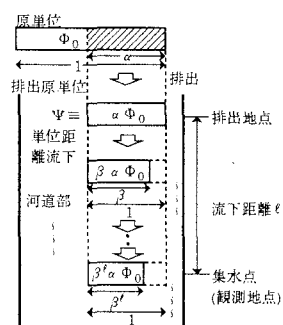


図-5 排出・流下過程における流出量の空間変化模式図

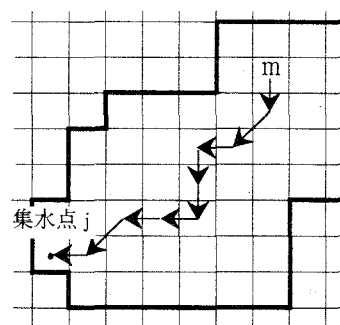


図-6 一つのメッシュからの流下経路

ここに、 N ：土地利用種別の総数、 $M|n$ ：土地利用種別 n のメッシュ総数および $m|n$ ：土地利用種別 n に関するメッシュの通し番号である。さらに、

$$\lambda_n \equiv \sum_{m|n}^{M|n} \beta^{l_{m|n}} \quad (4)$$

とにおいて、式 (3) を簡単な表示にすると、次のように書ける。

$$\Phi = \sum_n^N \lambda_n \Psi_n \quad (5)$$

式 (4) の定義より、 λ_n は土地利用種別 n のメッシュと観測地点としての集水点との距離に依存する集水域全体としての平均的流下率に対応しており、土地利用種別 n が集水点からどれだけ離れて分布しているかを示すパラメータとなっていることがわかる。また、流下過程での物質変化率が $\beta = 1$ となる場合には、 $\lambda_n = M|n$ となることから、 λ_n は集水域内での土地利用種別 n の総面積を表すと考えられる。そこで、以下では、 λ_n を集水域面積の効果を含んだ土地利用別流下率と呼ぶことにする。

3.2 土地利用別流下率を説明変数とする流下量の重回帰推定

上述の排出・流下過程のモデル式 (5) は、流下量 Φ を被説明変数、土地利用別流下率 λ_n を説明変数および土地利用別排出原単位 Ψ_n を未知係数とする重回帰式となっている。すなわち、適切な土地利用分類を対象として、式 (5) に基づく重回帰分析を行うことにより、流域内の土地利用種別ごとの流出特性を表現することが可能となる。ただし、ここでの重回帰分析に用いることのできるデータ数は、小集水域、すなわち測点数の 8 個と少ないため、重回帰分析における説明変数の個数を 2 つに限定する。

説明変数の個数は土地利用種別の数に対応するため、まず、有意な土地利用種別の分け方について考えてみる。前述の現地踏査より、観測期間中における流出水のソースは、主として、i) 家屋・事務所や寺社での洗濯水排出、散水、洗車など、ii) 工場などでの種々の屋外洗浄排水、iii) 公園やグラウンドなどでのスプリンクラー散水、iv) 水田からの浸出水によるものであり、畑地および舗装面からの排水は皆無であった。このため、排出源として考慮する必要がある土地利用種別は、水田、草地、家屋・事務所、工場および寺社の 5 種類に限定される。そこで、土地利用種別の分類パターンとして、(1) 水田と家屋・事務所、(2) 水田と建物用地、(3) 耕地と建物用地の 3 種類を考えることにする。なお、建物用地 (略称 B) は家屋・事務所 (H)、工場 (W) および寺社 (T) を合わせたもの、耕地 (略称 C) は水田 (P)、畑地 (F) および草地 (G) を合わせたものである。

表-1 は、説明変数としての土地利用別流下率 λ_n をこれら 3 種類の土地利用分類パターンに対して与え、流量 Q 、全窒素負荷量 L_{TN} および全リン負荷量 L_{TP} それぞれの土地利用別排出原単位 Ψ_n を重回帰分析によって推定した結果を示したものである。表中、 Ψ の添字は、上述の土地利用種別の略称を表している。なお、負荷変化率 β は、 $\beta = 1$ を初期値として与え、重回帰分析結果としての残差を最小化するように繰り返し計算を実行することによって、流下距離 100m 当たりの値として求められている。この表より、重回帰推定される土地利用別排出原単位 Ψ_n が負荷変化率 β が土地利用分類パターンにほとんど依存していないことがわかる。また、表-1 の結果を用いて推定される流下量 $\hat{\Phi}$ と実測流下量 Φ との比較を図-7 に示す。この図からも、土地利用分類パターンごとの相違はほとんど認められず、いずれのパターンにおいても比較的良好な結果が得られていると判断できる。これらのことより、以下では、分類パターン (3)：耕地 (C) と建物 (B) による結果を中心に土地利用種別およびその配置が流出量に及ぼす影響について考察してみることにする。

表-1 土地利用別排出原単位および流下率に関する重回帰結果

流出物質	Q			L_{TN}			L_{TP}		
分類パターン	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
ψ_H (t/km ² /day)	51.19			90.00			7.88		
ψ_B (t/km ² /day)		48.65	45.82		82.77	81.81		7.50	7.58
ψ_P (t/km ² /day)	21.42	24.47		42.69	45.38		5.35	5.77	
ψ_C (t/km ² /day)			25.34			45.54			4.58
β	0.985	0.984	0.983	0.980	0.980	0.978	0.976	0.975	0.974

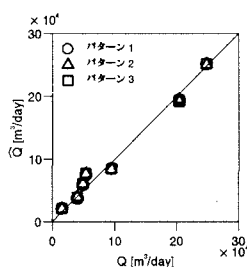
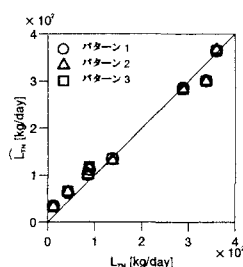
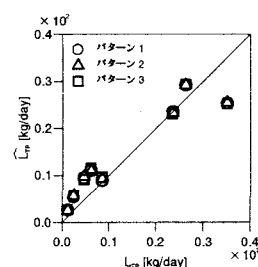
(a) 流量 Q (b) 全窒素負荷量 L_{TN} (c) 全リン負荷量 L_{TP}

図-7 流下量に関する実測値と重回帰推定結果との比較

3.3 土地利用別排出原単位と負荷変化率に関する考察

表-1に示した土地利用別排出原単位 Ψ_n を土地利用種別ごとに比較すると、建物(家屋・事務所、工場、寺社)からの排出原単位 Ψ_B が耕地(水田、畑地、草地)からの排出原単位 Ψ_C の2倍程度にも及ぶことがわかる。これらの比(Ψ_B/Ψ_C)は、流量 Q 、全窒素負荷量 L_{TN} および全リン負荷量 L_{TP} のそれぞれについて、約2.0、1.8および1.6であり、流出物質によって土地利用種別の違いが表れている。全窒素負荷および全リン負荷に関する排出原単位は、(排出源での流量)×(排出物質の濃度)として表されるので、耕地(C)からの排出物質の濃度 C_C に対する建物(B)からの排出物質の濃度 C_B の比 C_B/C_C は、全窒素および全リンそれぞれについて約0.9および0.8と求められる。この試算結果より、耕地からの全窒素および全リンの流出濃度は建物からよりも高くなる傾向が存在し、こうした傾向は全リンにおいてより顕著になることがわかる。

一方、表-1に示した負荷変化率 β を土地利用種別ごとに比較すると、土地利用種別の分類方法に依存することなく、負荷変化率 β はほぼ同じ値となっており、各流出物質ごとに一定の値を持つものと判断される。流量に関する β が1よりも小さな値となるのは、流下過程での河床部からの地下浸透や大気への蒸発によるものと推測される。また、全窒素や全リンに関する負荷変化率 β は、流下過程における沈殿・堆積、動植物(プランクトンを含む)による吸収、脱窒などによる大気中への放出などの様々な物質変化の結果の現れと解釈できる。窒素に比べ、リンの方が自然界に存在する絶対量は少ないため、河道中の水生植物からの要求量は、窒素よりもリンの方が大きくなる。このため、全窒素に関する負荷変化率 β よりも全リンの負荷変化率 β の方が小さな値を示しているのではないと思われる。ただし、これらの点については、流下過程におけるより詳細な物質収支を調べてみないと、結論を出すことはできないであろう。

次に、集水点ごとの負荷変化率 β の効果について考察してみる。図-8は、各集水点(観測地点)での流下量に関して、流下過程での負荷変化を無視した場合(負荷変化率 β を1とした場合)と考慮した場合との比較を示したものである。各図の左段は実測流下量 Φ と式(5)から求められる流下量 $\Phi|_{\beta=1}$ との比較であり、中段および右段は表-1の結果から推定される土地利用別流下量 $\lambda_n\Psi_n$ と流下過程での負荷変化を無視した場合の土地利用別流下量 $\lambda_n\Psi_n|_{\beta=1}$ との比較である。対象流域のほぼ全体を集水域とする測点P.8では、 $\Phi/\Phi|_{\beta=1}$ の割合が、流量で約50%、全窒素負荷量で約40%、全リン負荷量で約30%となっており、かなりの量の物質が流下過程で損失していることがわかる。また、流量 Q 、全窒素負荷量 L_{TN} および全リン負荷量 L_{TP} の全てにおいて、土地利用別の $\lambda_n\Psi_n/\lambda_n\Psi_n|_{\beta=1}$ の値が、耕地より建物の方で大きくなっている。こうした負荷変化率の効果は、式(4)で表される土地利用別流下率 λ_n に依存しており、 λ_n は流下距離 l に支配されるパラメータであるため、土地利用種別ごとの流下距離 l の確率分布を調べてみることにする。図-9は、各集水域における第 m メッシュから集水点(観測地点)までの流下距離 l_m の相対度数分布を土地利用種別(建物と耕地)ごとに比較したものの代表例である。全体的な傾向として、耕地(C)より建物(B)の方が集水点より遠くに分布しており、建物に関する土地利用別流下率 λ_n の方が耕地よりも小

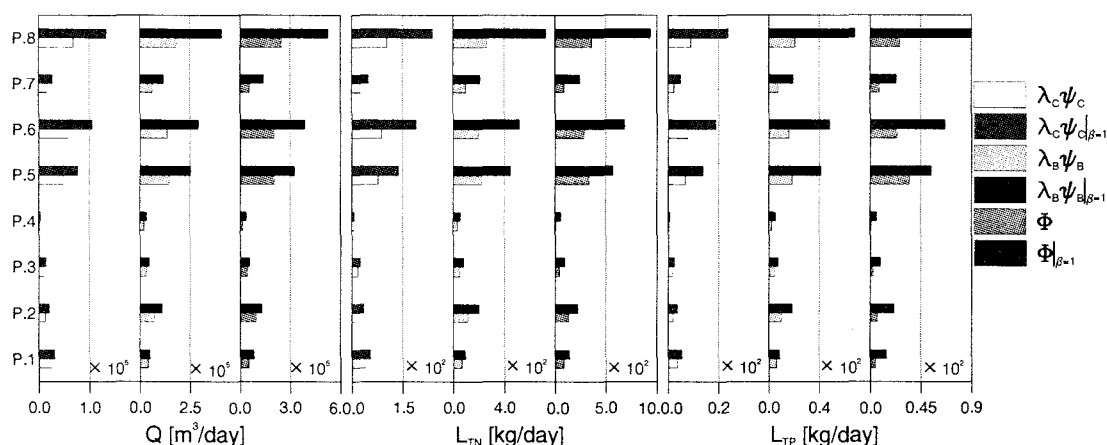


図-8 負荷変化率 β の効果に関する比較

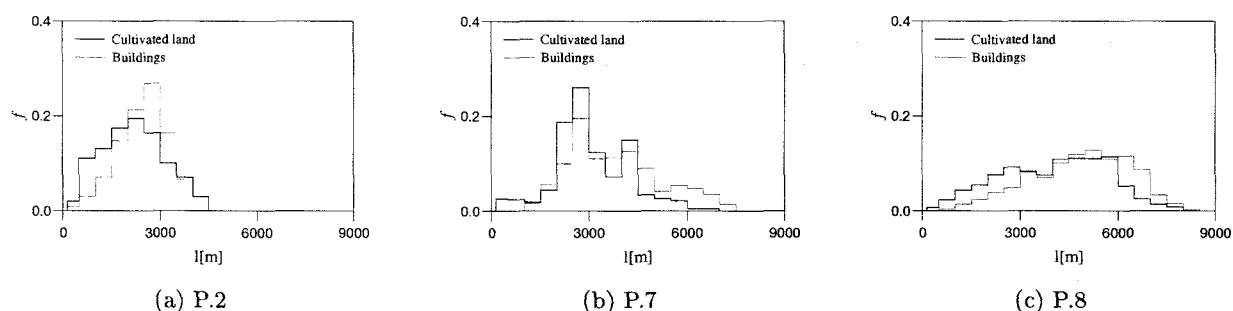


図-9 耕地および建物に関する流下距離の頻度分布

さくることがわかる。なお、和田ら²⁾は、汚濁負荷流出率が汚濁発生点と河川との位置関係、河川の流下距離、土地利用などに支配されることを指摘しているが、上述の結果はこの指摘を定量的かつ総合的に裏付けるものと言えよう。

4. 結語

以上、本研究では、晴天期における水文・水質観測、詳細な土地利用分布・流路網調査および物質排出・流下過程を表す簡便なモデルの提案を通じて、都市内小河川流域での水量、窒素およびリンの流出特性に及ぼす土地利用分布の影響を検討した。その結果、i) 耕地からの排出原単位は建物用地に比べ小さいものの、濃度として評価すると耕地の方が建物よりも高く、下水道整備率の高い都市内小河川での窒素・リン流出現象では、都市内にわずかに残存する耕地からの寄与が無視できないほど顕著となる可能性があること、ii) 流下に伴う負荷変化率の影響は無視できないほど大きく、排出負荷量のみならず、土地利用の空間的な分布特性が流出量を強く支配するため、河道中での自浄作用を利用して効果的に土地利用を配置することにより、窒素・リンの流出負荷を抑制できることを明らかにした。

謝辞：本研究で用いた岐阜市自動水質観測データをはじめとする各種資料は岐阜市衛生部より提供されたものであり、ここに記して深謝の意を表す。また、本研究が文部省科学研究費基盤研究(A)(2)(課題番号:07406015)・奨励研究(A)(課題番号:09750591)および文部省平成9年度創造開発研究の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 小林慎太郎: 土地利用別汚濁負荷流出タンクモデル, 河川汚濁のモデル解析 [國松孝男・村岡浩爾編], 技法堂出版, pp. 179-184, 1989.
- 2) 和田彦彦・三浦浩之: 都市化した中小河川の水質に及ぼす下水道等整備効果のモデル解析, 土木学会論文集, No.429/II-15, pp. 97-105, 1991.
- 3) Environmental Protection Agency: Hydrological Simulation Program — FORTRAN, Users Manual for Rel. 10, 1993.
- 4) 村上正吾・渡辺正孝・天野邦彦・林誠二・井上隆信: 河川環境整備のための流域水環境システムモデルの応用, 第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp. 135-140, 1997.