

長良川流域内の全窒素・全リン流出特性に 及ぼす土地被覆空間配置の影響評価

INFLUENCE OF THE DISTRIBUTION OF LAND COVERAGE ON THE RUNOFF PROCESS OF TOTAL NITROGEN AND TOTAL PHOSPHORUS IN THE NAGARA RIVER BASIN

都築克紀¹・篠田成郎²・山内幸雄³・田中雅彦⁴・野村一保⁵・湯浅晶⁶

Katsunori TSUDUKI, Seirou SHINODA, Sachio YAMAUCHI,
Masahiko TANAKA, Kazuyasu NOMURA and Akira YUASA

¹学生会員 工修 岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

²正会員 工博 岐阜大学助教授 流域環境研究センター (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

³学生会員 岐阜大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

⁴学生会員 岐阜大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

⁵学生会員 岐阜大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

⁶正会員 工博 岐阜大学教授 流域環境研究センター (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

The load of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in stream water was surveyed at 23 points in the Nagara River Basin (2000km²) located in the central part of Japan. Multivariate analysis was applied to relate the TN and TP data to the conditions of land coverage such as geologic feature, type of land use, population density, percent of sewered population, etc. The load of TN and TP was largely governed by the distribution of human activities such as industrial wastewater discharge, agricultural production, population density, domestic animal density.

Key Words : *distribution of land coverage, human activities, total nitrogen, total phosphorus, Nagara River Basin*

1. 緒言

広い流域内での将来の土地利用変化や社会・経済活動状況の変化などが河川水質にどのような影響を及ぼすのかを予測できるようにすることは、閉鎖性水域での富栄養化問題などの流域全体での環境問題を考える上で重要な課題である。従来より、土地利用を建物・水田・畑地・森林などに分類し、各土地利用種別からの汚濁物質流出負荷を原単位法によって推定する試みがされている^{1),2)}が、面源負荷に対する扱いには地域特性に起因する曖昧さが存在しており、客観的な推定・評価は難しくなっている。単に土地利用分布といっても、産業構造の相違や作物の種類などによっても汚濁負荷流出特性は変化するため、こうした土地利用種別だけの流域内水質の評価・管理には限界が存在する。

本研究では、長良川全流域を対象とした現地観測を通じて、河川水中の全窒素および全リン負荷量の流出が土地被覆空間配置とどのように関連するのかを、モデル式を用いて明らかにすることを目的としている。とくに、人口密度や農業粗生産額などの人間活動状況を

表すパラメータを利用して、土地被覆状態の空間的な配置の変化が河川水質に及ぼす影響についても検討を行う。

2. 対象流域内の土地被覆状態と現地観測

(1) 観測地点と観測結果

図-1は、1997年と1998年に実施した現地観測の対象流域と観測地点を示したものであり、長良川の源流(岐阜県郡上郡高鷲村)から主要な支川流入がなくなる東海大橋(河口から22.8km地点)までの長良川のほぼ全流域(約2000km²)に相当する。本研究では、集水域内の土地被覆状況の空間的配置と水質との関連を検討するため、測点同士の独立性が保たれる支川でのデータを用いて解析を進める。図-1には、支川上の測点(計23地点)を□印と数字で示しており、こうした地点を集水点とする集水域界および集水域を太線およびハッチングで表してある。また、○印と英字で示すものが本川上での測点である。採水や流量計測などの現地観測は、1997年には9月15日から12月16日にかけて

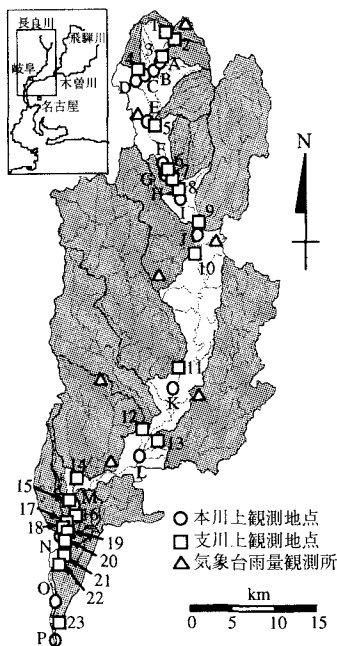
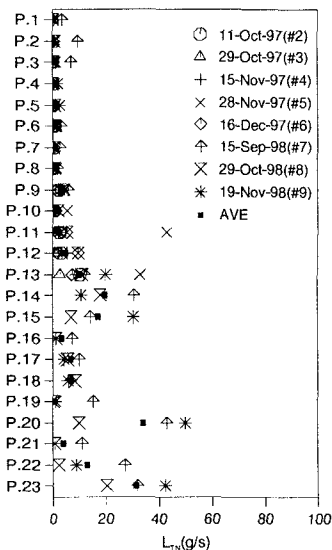
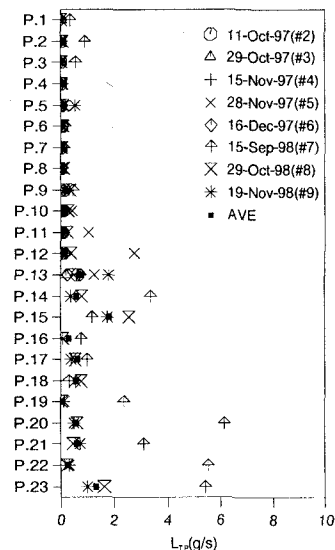


図-1 観測対象流域と観測地点



(a) 全窒素負荷量



(b) 全リン負荷量

図-2 各観測地点における観測結果

測点 L より上流の 25 地点において計 6 回、1998 年には 9 月 15 日から 11 月 21 日にかけて 39 地点 (図-1 中の全観測地点) において計 3 回実施された。観測を通じて得られた各支川観測地点における全窒素負荷量 L_{TN} および全リン負荷量 L_{TP} を図-2 に示す。図中凡例の観測日の後ろの記号は、観測日を表す記号とし、以下では、この記号を用いて観測日を表すものとする。また、観測地点数の少ない観測日 #1 (1997 年 9 月 15 日) の観測結果を除いた全ての観測結果に対して解析を行う。

(2) 土地利用分布と平均斜面勾配

対象流域内の土地利用分布については、国土地理院発行の 1/10 細分区分土地利用データを用いた。このデータには、3 次メッシュの 1/10 サイズ (約 100m 四方) の中の代表的土地利用種別が記載されているため、このメッシュサイズを基本として、以下の全ての空間的諸量を整備した。

この土地利用データでは、土地利用を 15 種類に区分しているが、本研究では、田、畑、森林、建物およびその他の 5 種類の土地利用種別にまとめて扱った (図-3)。全対象流域における土地利用面積割合は、森林が約 73 % と流域内の大部分を占め、耕地約 18 %, 建物用地約 6 % となっている。また、対象流域の上流域はほとんどが森林であり、下流域では森林はほとんど存在せず、田、畑および建物用地が多く分布していることがわかる。なお、土地利用の他に、斜面勾配も流出特性を表すと考えられるため、国土地理院発行 50m メッシュ数値標高データよりその平均を算出し、図-4 に示す。

(3) 人間活動を表す土地被覆状態量の分布

流域内の人間活動に対応する土地被覆状態量として、単位面積あたりの人口、下水処理人口、農業粗生産額、牛頭数、豚頭数および工場排水量を考える。これらのデータは、平成 7 年度国勢調査や岐阜県農林水産統計年報に掲載されている市町村別の値に基づき算出される。ただし、単純な面積平均値として求めると、森林としてのメッシュに人口が配されることになったりするため、家屋、畜舎、工場などの配置位置を勘案して、各メッシュ内の値を算出した。こうして求めた土地被覆状態量の例として、人口密度の分布を図-5 に示す。

3. 土地被覆状態量ごとの排出負荷原単位の推定

(1) 物質流下過程のモデル式

流下過程における物質量 Ψ の減少 (増加) が 1 次関数で表されるとすると、次式のようになる³⁾。

$$\frac{d\Psi}{dx} = -k\Psi \quad (1)$$

ここに、 x : 流下距離 [km] および k : 減少速度係数 [1/km] である。この時、 k は流下距離 x に対し一定であるとし、ある地点より排出される物質量を Ψ_0 とすれば、式 (1) は

$$\Psi = \Psi_0 e^{-kx} \quad (2)$$

となる⁴⁾。ただし、式 (2) は流域内の特定の点からの排出量を表現しているに過ぎないので、流域内のあるメッシュ m からの排出量を Ψ_m 、集水点に流達する物質

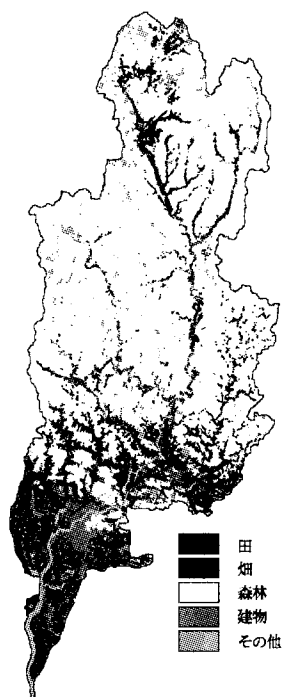


図-3 対象流域内土地利用分布

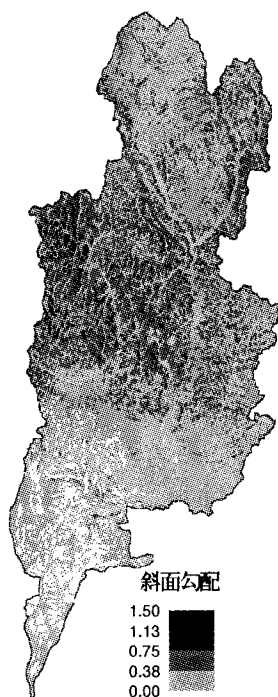


図-4 対象流域内斜面勾配分布

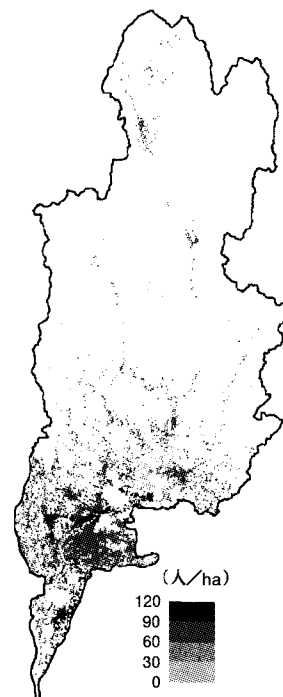


図-5 対象流域内人口密度分布

を Ψ とすると以下ようになる⁵⁾.

$$\Psi = \sum_m^M \Psi_m e^{-kx_m} \quad (3)$$

ここに M : 対象集水域内のメッシュ総数および x_m : メッシュ m から集水点までの距離である。ただし、 k は集水域内で一定とする。

また、 Ψ_m はメッシュ内の土地利用および各種人間活動情報によって決定されるとすれば、

$$\Psi_m = \sum_i^I \beta_i A_i \quad (4)$$

と表すことができる。ここに、 A_i : Ψ_m に寄与する人間活動情報、 β_i : A_i に対する原単位および I : 人間活動情報の数である。上式を式 (3) に代入すると、

$$\Psi = \sum_m^M \left(\sum_i^I \beta_i A_i |m \right) e^{-kx_m} \quad (5)$$

となる。ただし、 β_i は流域内で一定とする。

以上では、 k を集水域内で一定としてきたが、実際の河川では、河道の状況や気象条件などの違いにより時空間的に変化すると考えられる。そこで、 k がある区間ごとに変化すると仮定すると、式 (2) は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi_0 e^{-k_1 x_1} e^{-k_2 x_2} \dots e^{-k_n x_n} \\ &= \Psi_0 \exp \left(- \sum_n^N k_n x_n \right) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここに、 N : 区間の数である。この区間をメッ

シュ間とすると式 (5) は、以下のようになる。

$$\Psi = \sum_m^M \left(\sum_i^I \beta_i A_i |m \right) \exp \left(- \sum_{n|m}^{N|m} k_n x_n \right) \quad (7)$$

上式を土地被覆状態量ごとの排出負荷原単位を推定するモデル式とする。

(2) 減少速度係数 k に関する検討

ここでは、減少速度係数 k が、流域内のどのような要因により変化するかを検討する。

式 (2) では、減少速度係数 k は単位流下距離当りの単位となっているが、減少速度係数を単位流下時間当りとして表現することがあり、この単位流下時間当りの減少速度関数を k_t とすれば、以下のようになる。

$$\Psi = \Psi_0 e^{-k_t t} \quad (8)$$

ここに、 t : 流下時間である。式 (2) と上式から、 k と k_t とには以下の関係にあることがわかる。

$$k = k_t t / x = k_t / v \quad (9)$$

ここに、 v : 流速である。また、流速が、Manning の式によって表現されるとすれば、式 (9) は、

$$k = k_t / n^{-1} R^{2/3} i^{1/2} \quad (10)$$

となる。ここに、 n : Manning の粗度係数、 R : 径深および i : 水路勾配である。

ここで、式 (10) の右辺の各係数が、水文、気象および地形要因とどのような関係にあるのか考えてみる。まず、 k_t については、有機物質を分解する微生物や、窒

素やリンといった無機栄養塩を摂取し活動している植物の存在量（バイオマス）およびその活性度に関係している。実際、河川中の有機物質、とくに BOD についての係数の測定がなされており、これらの結果から、バイオマスや活性度の支配因子となっている水温や流量と関係があることがわかっている⁴⁾。 n は、河床の状態により決定されるものであるが、出水状況により変化することが予想され、流量やその支配要因である降水量と関係がある。 R についても、河床断面と水位により決定されるため、流量や降水量と関係がある。 i については、地形要因である地点間の距離と高低差のみに依存する。

以上のことより、 k_i 、 n および R については、同一地点であっても数時間といった時間スケールで時空間的に変化するものと考えられる。ただし、現時点においては、これらの係数とバイオマスや水文および気象要因との具体的な関係を検討するための十分なデータが無いため、ここでは、これらを一つの係数 α と表現し、式 (10) を i のみの関数とすると、

$$k = \alpha/i^{1/2} \quad (11)$$

となり、解析時には、解析対象流域内で α は一定との仮定の下で、観測日ごとに α を決定する。また、 i は、図-4 に示した斜面勾配より算出したものを使用する。

(3) 排出原単位および係数 α の推定

全窒素および全リン比負荷と土地利用種別、平均斜面勾配および各種人間活動情報との多変量解析の結果から、人口、工場排水量、農業粗生産額および牛・豚頭数が、全窒素・全リンの流出特性に大きく寄与していることが明らかとなっている⁶⁾ ので、式 (7) における人間活動情報 A_i については、上記の 4 つの人間活動情報を使用する。また、従来行われている土地利用種別を用いた解析についても行う。この時使用する土地利用種別は、建物用地、水田および畑地とする。また、排出原単位 β および α の推定に際しては、まず、 α を適当に与え、重回帰分析により β を推定する。この時、 α を変化させ、全ての β が正であり、なおかつ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り、 β および α を求めた。

人間活動情報を用いた解析から得られる排出負荷原単位および α を表-1 に示す。表中の「—」は、排出負荷原単位および α を推定する際に上述の条件を満たさず有意な解を得られなかったことを示す。各観測日ごとに推定された排出負荷原単位および α の値のばらつきが大きくなっており、そのばらつきの傾向を見いだすことはできない。また、全リン負荷量については、8 回の観測日のうち 3 回しか推定値を算出するに至らなかった。

た。図-6 は、観測日 #3 についての推定値と実測値を比較したものである。推定値と実測値との対応はたいへん良好である。他の観測日もほぼ同様に推定値と実測値の対応関係は良好である。しかし、推定された排出負荷原単位および α の観測日間のばらつきが大きく、普遍性を持つ流出負荷原単位および α を推定するためには、今後、さらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。

表-2 は、従来行われている土地利用種別のみから排出負荷原単位および α を推定した結果を示している。こちらも各観測日間の排出負荷原単位および α の推定値には、表-1 以上に大きなばらつきがみられる。図-7 は、図-6 と同じく観測日 #3 についての推定値と実測値を比較したものである。全体的に人間活動情報による解析よりも推定値と実測値との対応は良くない。

図-6 と図-7 とを比較した場合、図-7 では、とくに全窒素負荷量に関する推定結果は、実測値が高い負荷量を示すほど過小または過大評価となっているが、図-6 では、ほぼ推定値と実測値が一致している。このことは、単に土地利用面積割合を説明変数とするより、人間活動情報を説明変数とした方が全窒素負荷量および全リン負荷量をよく説明できることを示している。例えば、都市域と農村域とでは、同じ建物用地でも人口密度や污水处理方法などの違いがある。このような、土地利用種別のみでは表現しきれない流域の土地被覆特性を、人間活動情報を用いることにより表現可能となっている。このため、全窒素負荷量および全リン負荷量の推定に際し、人間活動情報を説明変数とした方が適当であると考えられる。以下では、人間活動情報を説明変数とした解析結果に注目し考察を行う。

4. 土地被覆空間配置の影響に関する考察

(1) 排出負荷原単位に関する考察

気象要因とくに降雨の影響を受けやすい農耕地からの排出負荷原単位は、観測日によって変化しうると考えられるが、工場からの排水による負荷は、工場の操業状態により変化をするため、それほど大きな変化を示すことはない。しかしながら、表-1 における工場排水からの排出負荷原単位は、最小値と最大値では 100 倍以上の差があり、このことから、全ての観測日における推定結果が、実際の排出負荷原単位を推定しているとは言いがたい。

このため、どの観測日の推定結果が確らしいか判断するために、負荷原単位の算出根拠が明確である人からの排出負荷原単位を判断基準として用いることとする。文献値^{4),7),8),9)} によれば、全窒素では 3.5~14.8g/人・日、全リンでは 0.4~1.5g/人・日程度の値をとる。

表-1 人間活動情報を用いた負荷原単位の推定結果
(a) 全窒素負荷量

#	人口 g/日・人	工場排水量 g/日・日/m ³	農業粗生産額 g/日・年/万円	牛・豚頭数 g/日・頭	α 1/km
2	0.03	15.01	0.47	15.05	-0.00048
3	7.25	39.14	0.10	14.21	0.00424
4	0.01	74.85	2.06	24.40	0.00254
5	—	—	—	—	—
6	0.07	454.36	3.84	28.32	0.00643
7	1.20	3.19	0.39	0.07	-0.00148
8	0.20	3.23	1.28	0.16	-0.00020
9	0.15	229.22	22.98	41.66	0.00822

(b) 全リン負荷量

#	人口 g/日・人	工場排水量 g/日・日/m ³	農業粗生産額 g/日・年/万円	牛・豚頭数 g/日・頭	α 1/km
2	—	—	—	—	—
3	0.01	0.00	0.02	1.64	0.00174
4	0.00	0.89	0.09	1.52	0.00132
5	—	—	—	—	—
6	0.00	4.40	0.10	2.51	0.00455
7	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—

表-2 土地利用種別を用いた負荷原単位の推定結果
(a) 全窒素負荷量

#	建物 g/日・km ²	水田 g/日・km ²	畑地 g/日・km ²	α 1/km
2	584402.44	389.29	10145.64	0.01100
3	219983.50	4.19	5311.79	0.01337
4	64716.12	144.79	4939.13	0.00003
5	—	—	—	—
6	404776.22	32748.51	25.84	0.00746
7	574419.75	81078.67	550.38	0.00346
8	39075.54	169515.19	159.51	0.00325
9	155.74	0.08	173.44	-0.00473

(b) 全リン負荷量

#	建物 g/日・km ²	水田 g/日・km ²	畑地 g/日・km ²	α 1/km
2	16.98	1309.63	1976.72	0.00045
3	6142.75	1.05	238.72	0.00434
4	10.27	1445.28	2084.18	0.00057
5	63131.49	17071.51	3.45	0.01187
6	2744.25	1524.08	42.53	0.00266
7	174254.77	13930.41	104.52	0.00679
8	2953.32	7002.42	31.98	0.00196
9	—	—	—	—

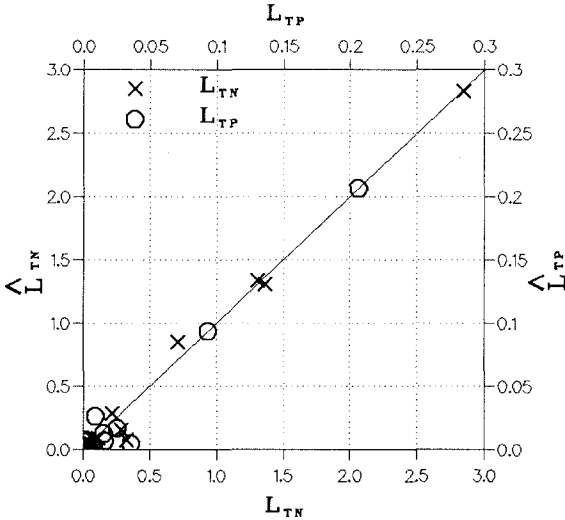


図-6 負荷量に関する実測値と人間活動情報を用いた推定結果との比較

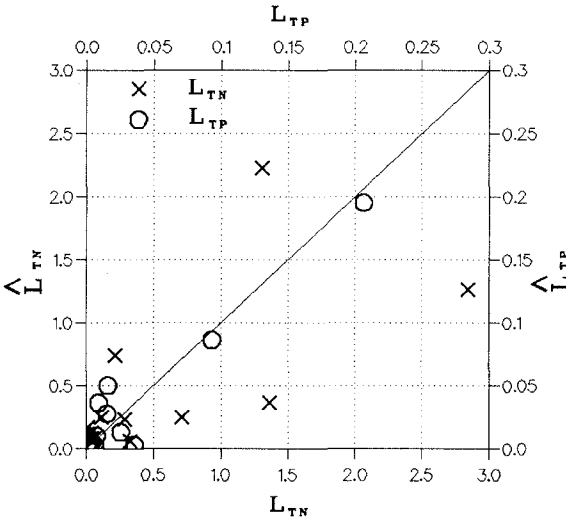


図-7 負荷量に関する実測値と土地利用種別を用いた推定結果との比較

値のばらつきは、下水道の有無やその処理方法の違いによるものである。この範囲に適合する推定結果は、全窒素負荷量に関する観測日#3のみである。この他の推定結果については、信頼性は低いと言える。

(2) 係数 α に関する考察

減少速度係数 k は、その値が0のとき流下過程において物質量は変化しないことを示し、正の値のときは減少、負の値の時は増加することを表している。また、河川中の物質量は、晴天時などの流況が穏やかな時には、沈降などにより減少し、逆に洪水時などは、堆積物の掃流などにより増加すると予測される。しかし、表-1の α は、流況が高水および豊水に区分される観測日#6および#9において、他の観測日より高い正の値を示し、逆に、流況が平水および低水に区分される他の観測日では、負の値を示す場合があり、上記の予測とは、

反対の結果となっている。

このことは、減少速度係数 k を水路勾配 i のみの関数とし、 α を流域内一定としたことに起因していると考えられ、 α とバイオマスや水文および気象要因との具体的な関係を検討する必要があると言える。

(3) 土地被覆空間配置の変化に伴う流出量の変化予測

流域内での土地被覆空間配置の相違が、流出量にどのような影響を及ぼすか検討するために、推定された排出負荷原単位および α を使用し、次の2つのケースを想定した土地被覆空間配置を変化させたときの、流出量の変化予測を行う。ここで使用する推定された排出負荷原単位および α は、もっとも確らしい推定結果である全窒素負荷量に関する観測日#3の結果を用いる。また、対象とする流域は、観測地点 P.13（支川名：津保川）を集水点とする流域とする。

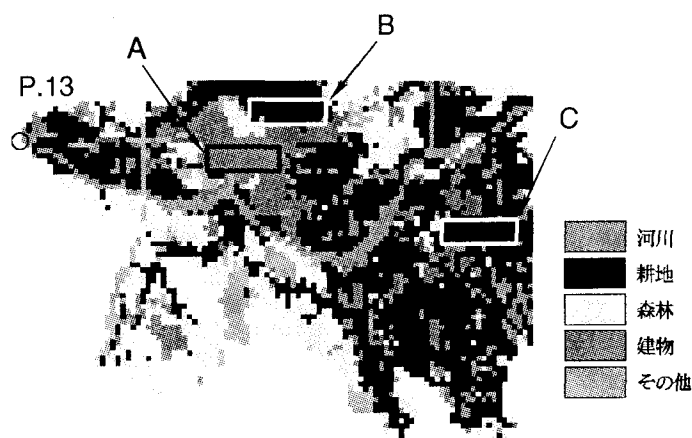


図-8 人間活動情報変更領域

想定したケースは、図-8に示した領域 A の土地被覆情報を 1) 領域 B と入れ替えた場合、2) 領域 C と入れ替えた場合を想定した。なお、領域 A の土地利用種別は、建物用地であり、領域 B および領域 C は、そのほとんどが耕地である。領域の入れ替えに際しては、土地利用のみでなくそれぞれの土地利用種別に付随した人口などの人間活動情報についても同様に入れ替えを行う。ケース 1) と 2) の違いは、入れ替えを行う領域の集水点までの距離のみである。また、流域内の各土地被覆情報の総計は変化していない。つまり、空間配置を考慮しない解析では、流出量は変化しない。こうした条件のもとで計算された全窒素負荷量と現状の負荷量との比を表-3に示す。対象となる領域は、対象流域の約 0.3 % の面積に過ぎないが、流出する全窒素負荷量は、それぞれ 2 % および 4 % 減少している。こうしたことは、従来の土地被覆情報の空間配置を考慮しない解析では、予測できないことであり、土地被覆空間配置を考慮することは、流出予測を行う場合重要であることが示されたと言える。

5. 結語

以上、本研究では、流域内の土地被覆状態量と全窒素および全リン負荷量の流出特性との関係を現地観測結果および土地被覆状態量の空間配置を考慮できるモデル式を用いて検討した。その結果、流下過程での物質の変化を表現する減少速度係数は、地形要因のみならず、バイオマスや水文および気象要因の関数として表現される必要があることを示唆できた。また、流域内の土地被覆状態から流出量を推定する場合、土地被覆状態量のみでなく、その空間配置を考慮することが重要であることがわかった。

謝辞：本研究の実施に当たり、現地観測に協力して下

表-3 変化予測結果と現状の推定結果と各ケースごとの推定結果との比

	負荷量 [g/s]	現状との比
現状	2.83	1.00
case1	2.78	0.98
case2	2.71	0.96

さった久野佳毅氏 (愛知県庁)、天野弘詞氏 (岐阜県関市役所) および高坂宗和氏 (株式会社太陽建設コンサルタント) に深謝の意を表す。また、本研究が文部省科学研究費地域連携推進研究 (1)(課題番号: 11794029) の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 海老瀬潜一：流域内土地利用形態別流出負荷量原単位の解析, 国立公害研究所研究報告, 第 50 号, pp. 89-102, 1994.
- 2) 平田健正・井伊博行・長谷部正彦・江種伸之・坂本康・糸川高德・西山幸治・酒井信行・岩崎宏和：土地利用特性の河川水質に及ぼす影響—大阪府石川流域—, 土木学会論文集, No. 614/II-46, pp. 97-107, 1999.
- 3) 合田健：水質工学 基礎編, 丸善, pp. 179, 1975.
- 4) 國松孝男・村岡浩爾編著：河川汚濁のモデル解析, 技法堂出版, pp. 99, 59, 181-182, 1989.
- 5) 篠田成郎・早藤貴之・都築克紀・湯浅晶：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, 第 4 回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, pp. 249-254, 1998.
- 6) 篠田成郎・都築克紀・山内幸雄・高坂宗和・田中雅彦・野村一保・湯浅晶：長良川流域での全窒素・全リン流出特性に及ぼす土地被覆状態の影響評価, 河川技術に関する論文集, 第 5 巻, pp. 59-64, 1999.
- 7) 市川新：都市河川の環境科学, 培風館, pp. 149, 1980.
- 8) 田淵俊雄・高村義親：集水域からの窒素・リンの流出, 東京大学出版会, pp. 157-158, 207, 1985.
- 9) 松井賢一：長良川流域の現況水質解析と発生源別排出汚濁負荷量の算定, 平成 9 年度岐阜大学工学研究科修士論文, 1998.

(1999. 9. 30 受付)