

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

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

篠田成郎¹・都築克紀²・山内幸雄³・高坂宗和⁴・

田中雅彦³・野村一保³・湯浅晶⁵

Seirou SHINODA, Katsunori TSUDUKI, Yukio YAMAUCHI, Munekazu KOUSAKA,
Masahiko TANAKA, Kazuyasu NOMURA and Akira YUASA

¹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)

²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)

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正会員 工修 株式会社太陽建設コンサルタント (〒500-8868 岐阜市光明町3-1)

⁵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, types of land use, population density, percent of sewered population, etc.

Types of land use were insufficient to evaluate the TN and TP loading in multiple regression analysis. The load of TN and TP was largely governed by other parameters of human activity such as industrial wastewater discharge, agricultural production, etc. Control of wastewater from stockbreeding was especially effective to decrease the TN and TP runoff.

Key Words : *land use, land coverage, human activity, total nitrogen, total phosphorus, Nagara River Basin*

1. 緒言

水量のみならず水質をも含めた流出現象を支配している流域内土地被覆状態を客観的に評価するとともに、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、従来の河川工学的見地からの治水・利水安全度を高めるだけでなく、流域全体の環境を良好な状態で保全・管理していくために重要な課題である。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から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状態とどのように関連するのかを、多変量解析から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、土地被覆状態の変化が河川水質に及ぼす影響についても検討を行う。

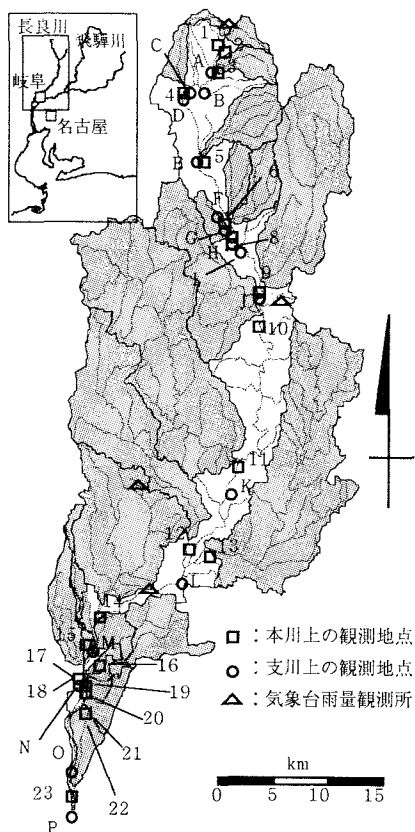
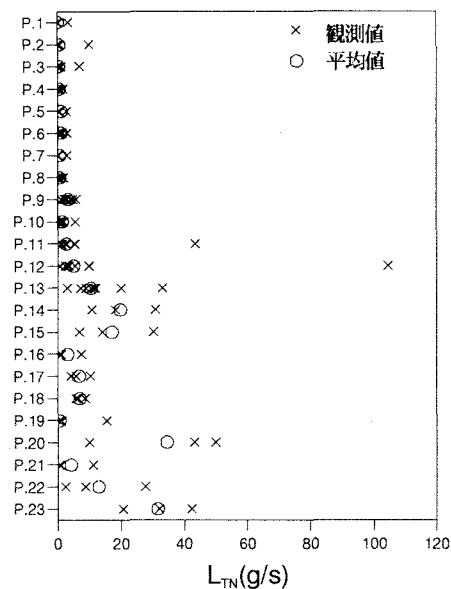


図-1 観測対象流域と観測地点

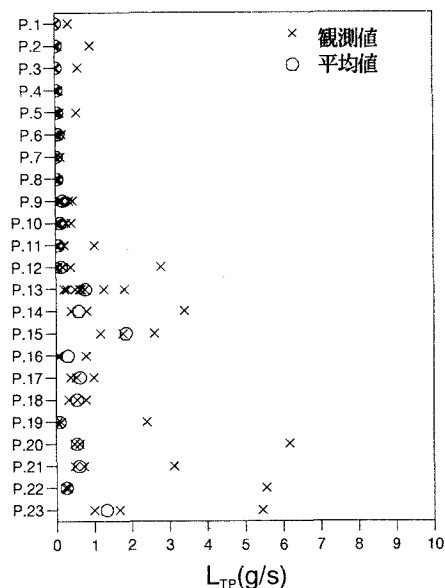
2. 対象流域内の土地利用分布と現地観測

(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。図中の×印および○印は、それぞれ観測結果および各測点における平均負荷流出量を示している。以下では、観測地点数の少ない1997年9月



(a) 全窒素負荷量 L_{TN}



(b) 全リン負荷量 L_{TP}

図-2 各観測地点における観測結果

15日の観測結果を除いた全ての観測結果と○印で示される平均負荷流出量とに対して解析を行う。なお、降水量などの気象データについては、図-1中に△印で示される対象流域内に存在する気象台観測所のデータを使用するものとする。

(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、国土院発行の1/10細分区画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100四方)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³⁾。

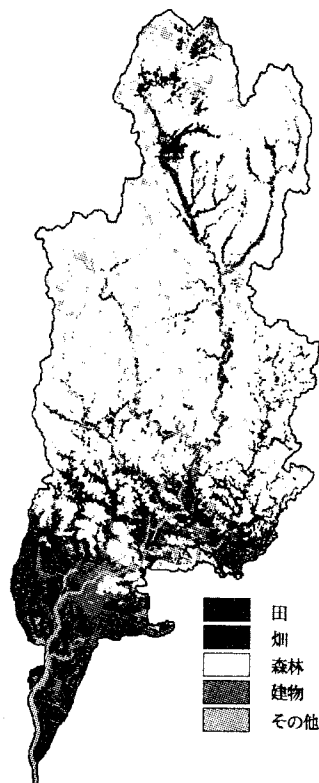
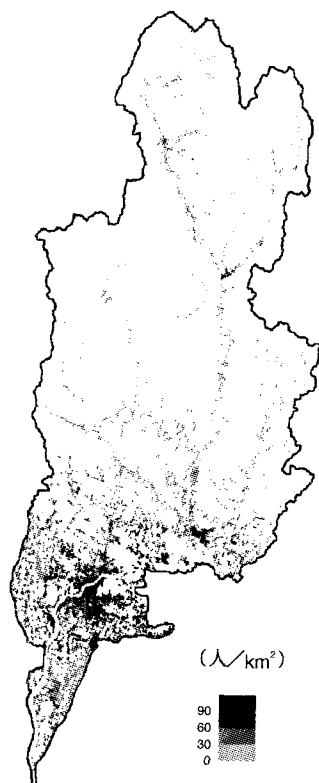
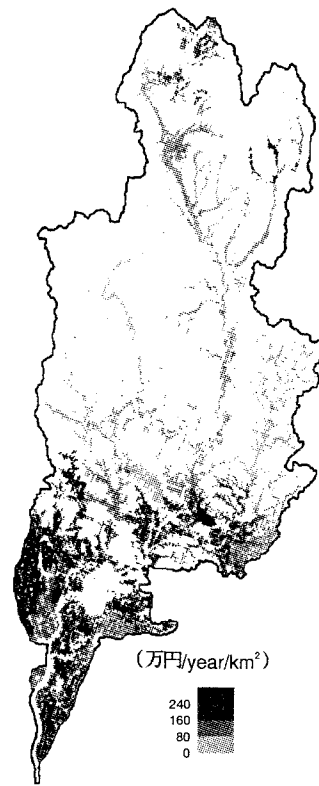


図-3 対象流域内土地利用分布



(a) 人口密度分布



(b) 単位面積当たり農業粗生産額

図-4 対象流域内の土地被覆状態量分布の例

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た。

(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、人口密度および単位面積当たり農業粗生産額の分布を図-4に示す。

3. 流出量と土地被覆特性量に関する多変量解析

(1) 基本変量としての土地被覆特性量

流域内において人間が活動している限り、河川を流れる水は人間活動による何らかの影響を受けている。ここでは、上述の土地利用種別、平均斜面勾配および人間活動を表す土地被覆状態量を土地被覆特性量と総称し、これらの諸量と全窒素および全リンの流出負荷量との関係を検討することにする。以下での多変量解析において対象とする土地被覆状態量は次の通りである。

水田、畑地、森林および建物用地の面積割合：土地利用としての地表面状態の相違

人口密度および単位面積当たりの下水道未処理人口：人間活動の直接的影響の度合い

単位面積当たり農業粗生産額：耕地における農業経営規模や作物の違い

単位面積当たり牛・豚頭数：家畜のふん尿の影響度

単位面積当たり工場排水量：産業構造の違い

平均斜面勾配：流出率を支配

(2) 流出量に影響を及ぼす土地被覆特性量の抽出

まず、河川水中の全窒素および全リン負荷量を

表-1 因子分析に基づく重回帰分析結果（標準化後）

(a) 全窒素比負荷

流況	観測日	面積割合		単位面積当たり					重回帰係数
		畑地	建物	人口	農業粗生産額	牛・豚頭数	工場排水量	下水道未処理人口	
○	11-Oct-97			0.509	0.564		0.241		0.90
○	29-Oct-97				0.234	0.406		0.228	0.34
□	15-Nov-97			-0.163	0.848		0.438		0.72
■	28-Nov-97			-0.124	0.040		0.915		0.75
●	16-Dec-97			-0.023	0.162		0.685		0.46
□	15-Sep-98	0.265	0.448			0.313			0.51
□	29-Oct-98			0.018		0.749	0.528		0.84
●	19-Nov-98			-0.097		0.598	0.755		0.84
	平均			0.083		0.644	0.661		0.91

(b) 全リン比負荷

流況	観測日	面積割合		単位面積当たり					重回帰係数
		畑地	建物	人口	農業粗生産額	牛・豚頭数	工場排水量	下水道未処理人口	
○	11-Oct-97			0.594	0.534		-0.236		0.82
○	29-Oct-97			0.249	0.013			-0.103	0.03
□	15-Nov-97			-0.116	0.891		0.053		0.73
■	28-Nov-97			-0.085	0.007		0.806		0.60
●	16-Dec-97			0.151	-0.101		-0.189		0.03
□	15-Sep-98	0.094		0.407		0.338			0.39
□	29-Oct-98			-0.033		-0.079	0.993		0.96
●	19-Nov-98			-0.054		0.234	0.892		0.81
	平均			0.012		0.295	0.895		0.89

表-2 土地利用種別面積割合を用いた

重回帰分析結果（標準化後）

(a) 全窒素比負荷

観測日	面積割合			重回帰係数
	水田	畑地	建物	
11-Oct-97	0.108	0.528	0.770	0.84
29-Oct-97	0.657	0.176	-0.156	0.30
15-Nov-97	0.244	0.799	0.214	0.66
28-Nov-97	-0.269	-0.059	0.545	0.18
16-Dec-97	0.180	0.099	0.221	0.13
15-Sep-98	0.640	0.257	-0.039	0.58
29-Oct-98	0.789	0.227	-0.289	0.42
19-Nov-98	0.266	0.329	0.115	0.29
平均	0.455	0.215	0.182	0.42

(b) 全リン比負荷

観測日	面積割合			重回帰係数
	水田	畑地	建物	
11-Oct-97	0.418	0.578	0.379	0.67
29-Oct-97	0.681	0.019	-0.446	0.25
15-Nov-97	0.379	0.862	-0.025	0.71
28-Nov-97	-0.164	-0.021	0.444	0.13
16-Dec-97	0.725	-0.012	-0.590	0.31
15-Sep-98	0.717	0.064	0.014	0.55
29-Oct-98	0.288	0.327	0.060	0.26
19-Nov-98	0.410	0.252	0.048	0.30
平均	0.501	0.267	-0.019	0.35

流況 ■ 高水 ● 豊水 □ 平水 ○ 低水

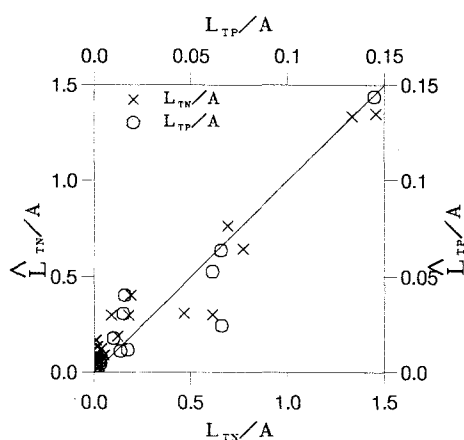


図-5 平均比負荷に関する実測値と因子分析に基づく重回帰推定結果との比較

集水域面積で除したもの(比負荷)と上述の10個の土地被覆特性量との相互関係を規定する因子数を主成分分析から決定する⁴⁾。一般に、因子分析では、因子数を決定するための基準として、主成分分析によって得られる累積寄与率が用いられるため、ここでは、変量の全変動の8割以上を表現できる(累積寄与率が0.8を超える)主成分の数を因子分析における因子数と扱うものとした。各観測データおよび平均値のいずれの解析結果においても、第3主成分まで初めて累積寄与率が0.8を上回っていることから、因子分析での因子数を3とした。

次に、因子分析において特定の因子にのみ高い負荷量を示す変量をその因子を代表する変量として捉えることができるため、こうした変量を代表変量として抽出を行う。解析の結果、各観測データおよび平均値の解析ごとに抽出される代表変量は多少異なるものの、主に、人口密度および単位面積当たり

工場排水量が抽出された。また、このほかの代表変量としては、1997年の上流部のみの観測結果に対しては、単位面積当たり農業粗生産額が、1998年の全流域を対象とした観測結果については、単位面積当たり牛・豚頭数が抽出された。

(3) 流出量と土地被覆特性量との重回帰分析

各観測日および平均値における全窒素および全リン比負荷を被説明変数として得られる3種類の抽出された土地被覆特性量に関する重回帰係数を表-1に示す。表中の重回帰係数は、各説明変数の影響の大きさを比較するために、説明変数および被説明変数を標準化した場合の結果である。なお、表中には、流量観測結果から推定される流況も記載してある。各観測日の流況は様々であるものの、重回帰係数の全体的傾向として、単位面積当たりの工場排水量が全窒素や全リンの流出に大きく寄与していることがわかる。また、上流域のみの解析結果においては、単位面積当たりの農業粗生産額が、全流域では、単位面積当たり牛・豚頭数といった農業活動に関連する土地被覆状態量の寄与が大きくなっている。図-5は、平均値についての重回帰係数を用いた時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良好であり、抽出された土地被覆状態量による推定が十分可能であると言える。

表-2は、従来行われている土地利用種別のみから比負荷を推定した結果得られる標準化後の重回帰係数を示したものである。ここでは、説明変数として水田、畑地および建物用地の3種類を採用している。重回帰係数については、いずれの土地利用種別においても一定の傾向を見いだすことができないが、

表-1と比較すると、とくに1997年のデータについて、畑地面積割合と単位面積当たり農業粗生産額、建物面積割合と人口密度および単位面積当たり工場排水量との間に関連性が存在する様に思われる。平均値についての重回帰係数を用いた時の推定値と実測値を比較したものを図-6に示す。推定値と実測値との対応は良好ではなく、土地利用種別のみでの推定は困難であると言える。

4. 流出量に及ぼす土地被覆分布状況の影響に関する考察

(1) 生活系の影響

生活系からの窒素・リンの流出は、主に、家庭から排出されるし尿と雑排水である。家庭からの排水は、下水道処理施設、単独浄化槽などの処理を経て、またはそのまま河川へと流入する。また、原単位法では、人間一人当たりの原単位の算出根拠が明確なため、地域的な差を考慮する必要が無い。それゆえ、発生負荷量と人口密度とは直線関係にある。ただし、下水の処理方法には地域差があるため、河川に排出される負荷量には、同一の人口密度であっても地域差が生じる。生活系の影響を評価するには、人口密度だけでなく下水処理に関する指標と併せて評価する必要があると考えられる。しかしながら、表-1では、主に人口密度だけで生活系の影響が評価されている。また、重回帰係数の正負の記号の違いについて、気象要因との関連を見いだすことはできないだけでなく、重回帰係数の値も他の因子の値より小さい。このことから、本対象流域においては、生活系の影響は小さいのではないかと考えられる。

(2) 工業系の影響

長良川流域内の工場排水については、岐阜県の水質管理目標値として業種別に排水中の濃度による規制が行われている。しかし、これは濃度による規制であるため、濃度としては低くても流量が大きな場合には高い負荷量を示すことも考えられる。また、一日あたりの平均排水量が50m³未満の事業所にはこうした規制は適用されない。表-1の重回帰分析の結果では、工場排水量は河川中の全窒素や全リンの負荷量に大きな影響を及ぼしている。このことは、工場からの排水中濃度は低くても、排出流量が大きいために高い負荷量を示すこととなっていると考えられる。また、比負荷は、大規模な工場などの大点源が存在すると大きくなる性質を持っているとの報告⁵⁾もあり、重回帰分析の結果と一致する。

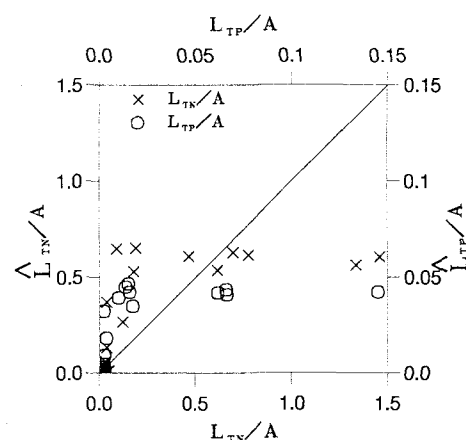


図-6 平均比負荷に関する実測値と土地利用種別面積割合を用いた重回帰推定結果との比較

表-3 変化予測のための重回帰分析結果

	単位面積当たり				重相関係数
	人口	農業粗生産額	牛・豚頭数	工場排水量	
L_{TN}/A	0.186	-0.174	0.697	0.707	0.91
L_{TP}/A	-0.02	0.055	0.279	0.881	0.89

(3) 農業系の影響

流域からの窒素・リンの流出量を推定する上で耕地は重要な要素である。しかし、作物の種類、施肥量、降雨の状況、季節、畑地か水田か、水田については灌漑方法の違いなどによって、そこからの流出量は大きく違ってくる。既存の研究成果では、農業地域における年間の窒素流出負荷量は0.1から5.2t/km²、リンについては0.01から0.9t/km²といった報告⁵⁾がある。このような流出負荷量のばらつきが、土地利用種別のみを用いた重回帰分析における水田および畑地面積割合の重回帰係数に一定の傾向が現れなかった原因と考えられる。

耕地の影響を農業粗生産額として捉えた場合、降雨や季節といった自然要因的な部分は表現されないものの、作物の種類や施肥量の影響については勘案されることになると考えられる。表-1の単位面積当たり農業粗生産額に関する重回帰係数は、値自体のばらつきはあるものの、窒素・リンの流出量を増加させる傾向を示している。

牛や豚などの家畜のふん尿が河川水質に及ぼす影響は、それらの処理形態により異なる。岐阜県では畜産系の排出基準も定められているが、その基準値は製造業種の約4倍程度であり、たとえ基準値以下であっても河川水質に与える影響が少ないとは言えない。表-1の単位面積当たり牛・豚頭数の重回帰係数では、1カ所小さな負の値を示しているが、そのほかは正の値であり、とくに窒素の場合に高く、河川水質に与える影響は大きいと言える。

(4) 土地被覆分布の変化に伴う流出量の変化予測

全窒素および全リン比負荷を被説明変数とし、

人口密度，単位面積当たり農業粗生産額，単位面積当たり牛・豚頭数および単位面積当たり工場排水量を説明変数とした重回帰分析を行う。表-3は，上述の重回帰分析を行って得られる切片および重回帰係数を示したものである。この重回帰式を用いて次の4つのケースを想定した土地被覆分布の変化に伴う流出量の変化予測を行う。1) 全流域において人口密度が1.5倍になった場合。2) 全流域において単位面積当たりの農業粗生産額が1.5倍になった場合。3) 全流域において単位面積当たりの牛・豚頭数が0.5倍になった場合。4) 全流域において単位面積当たりの工場排水量が0.5倍になった場合。なお，3)および4)は，それぞれの排出基準が現在の基準の半分の値になったことに相当する。こうしたシナリオの下で計算された全窒素および全リンの負荷量を図-7に示す。表-3中の標準化後の係数から，全窒素および全リン比負荷ともに単位面積当たりの工場排水量の影響が大きいことがわかる。しかし，実際の負荷量の変化量としては，単位面積当たりの牛・豚頭数の影響が大きく寄与している。このため，長良川流域における水質改善策として一番効果的なことは，畜産系からの負荷流出量を削減することと思われる。

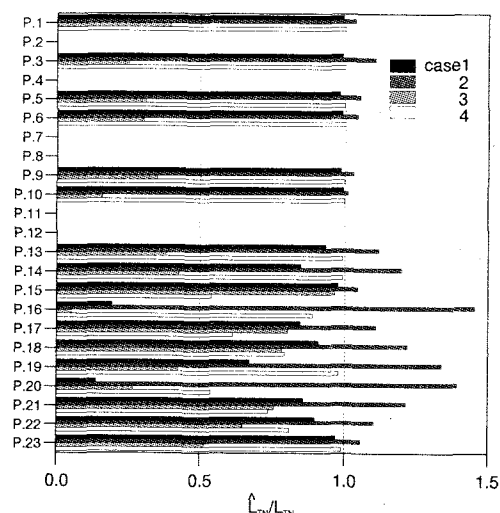
5. 結語

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様々な土地被覆情報に基づいた多変量解析により検討した。その結果，土地利用面積割合のみで全窒素および全リン比負荷を表現できない場合があることを示せた。また，全窒素および全リン比負荷を説明しうる土地被覆状態量は，人口密度，単位面積当たり農業粗生産額，単位面積当たり牛・豚頭数および単位面積当たりの工場排水量であることを明らかにした。とくに，長良川流域では，単位面積当たりの工場排水量の影響が大きいことに加え，畜産系からの全窒素および全リン排出負荷量の寄与も大きいことが明らかとなった。

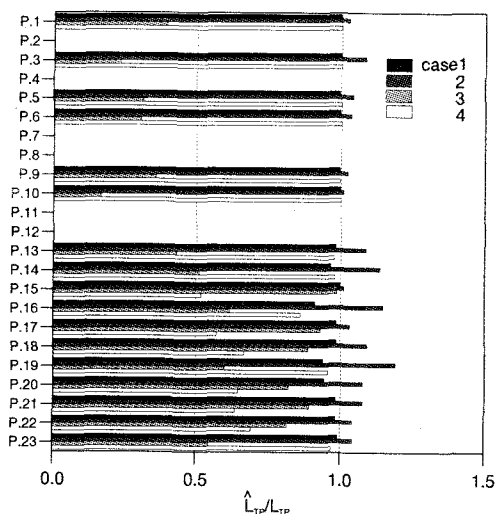
謝辞：本研究の実施に当たり，現地観測に協力して下さった久野佳毅氏(愛知県庁)および天野弘詞氏(岐阜県関市役所)に深謝の意を表す。また，本研究が文部省科学研究費奨励研究(A) (課題番号：09750591)の一部であることを付記する。

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



(a) 全窒素負荷



(b) 全リン負荷

図-7 平均値に関する推定式による現状の推定結果と各ケースごとの推定結果との比

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・桑川高德・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) 高坂宗和：長良川の水質に及ぼす流域内土地被覆状況の影響評価，平成 10 年度岐阜大学大学院工学研究科修士論文，1999.
- 4) 都築克紀・篠田成郎・間野耕司・佐藤嘉則・湯浅晶：山地森林内渓流水中全窒素濃度に及ぼす土地被覆分布特性の影響評価，環境システム研究，26，pp. 119-127，1998.
- 5) 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，1985.

(1999. 4. 26受付)