

<研究ノート>

群馬県内における利根川上流部を構成する各流域の水質と流域特性との関係

武 藤 完 一

Relationship between Water Chemistry and Characteristics in Several Watersheds Consisting of the Upper Reaches of the Tone River in Gunma Prefecture

Kannichi MUTOU

要 旨

河川の水質はその河川の流域の土地利用形態の影響を強く受けるとされている。今回、河川水質に大きな影響を与えると考えられる要因を選定して、海老瀬モデルと浜端モデルのスキームに基づき重回帰分析を行い、それらの要因が西毛地方の各水系の水質に与える寄与度を検証した。その結果精度の高い重回帰式が得られたが、本式は海老瀬の推定式に近いものであること、様々な種類の河川に適用できることなどが新たに分かった。

(キーワード：河川水質、流域特性、重回帰分析)

Summary

It is said that water chemistry is significantly dominated by human activities in its watersheds. We have investigated to what extent those characteristics have influences on water chemistry in several watersheds in the western part of Gunma prefecture, using multiple regression analysis based on EBISE MODEL and HAMAHATA MODEL. As a result, a fine multiple regression model has been gained. It has been found that this new model is similar to EBISE MODEL and is available for various types of rivers.

(key words : water chemistry, characteristics in watersheds, multiple regression analysis)

1 はじめに

流域の土地利用状況と河川水質との間には強い相関があることは、幾つかの研究によって指摘さ

れている。それらの研究は、浜端悦治等による流域・水質評価モデル¹⁾、海老瀬潜一による河川水質の推定式²⁾、EUのlogistic regression model³⁾、等である。今回は、浜端等の流域・水質評価モデルと海老瀬の河川水質推定式を援用しつつ、群馬県西南部の5水系のデータを用いて、河川の水質と流域の土地利用状況との関係の検証を試みた。なお、用いたのは各河川のTNの平成14年の年間の平均値である⁴⁾。

2 水質モデル

2-1 海老瀬の重回帰推定式

本推定式は、多くの河川において実測された流出負荷量とそれぞれの河川流域の土地利用形態別面積比率をもとに、その重回帰分析によって排出負荷量に流達率・流出率を併せた形での各土地利用形態別の流出負荷量原単位の算定を試みるものである。

そのスキームは、

- (i) 用いるデータはその一部に降雨時流出負荷観測値を含む定期的かつ長期間の観測値（平均値）とする。
- (ii) 工場排水や下水・し尿処理場排水等の河川流出負荷量への影響の大きな河川は解析対象から除く。
- (iii) 生活排水は市街地負荷の一部として市街地面積に比例し、市街地面積比率の中に表現できるものとする。
- (iv) 下水道の普及した流域と下水道のない流域とは負荷の特性が異なるため、別々の解析データ群として解析する。
- (v) 畜産排水はその大半が農地還元処分である場合、農耕地（水田・畑地）の面積比率で表現できるものとする。
- (vi) 河川間の流域規模の相違による影響を除去するために、流出負荷量を流域面積で除した比流出負荷量を解析に用いる。

以上のスキームに基づき、霞ヶ浦西浦流域（流域面積 1,391.8km²）に流入する主要10河川について、その解析結果を表1に示す⁵⁾。重回帰式の目的変量は各河川の汚濁物質ごとの比流出負荷量であり、説明変量は面源である市街地、林地、水田、畑地の土地利用面積比率である。

なお、林地の流出負荷量原単位は全ての水質項目で負となったので、林地（草地を含む）の流出負荷量への寄与は近似的に零として分析を行った結果が表1である。

さらに、その後の多くの河川の解析に当たっては流域の属性から判断して、山地河川、田園地河川、市街地河川に分類して解析を行っている。

表1 重回帰分析による土地利用形態別流出負荷量原単位 (単位: kg/km²・y)

土地利用形態	TN	TP	TCOD	Cl ⁻
水田	911	189	12,600	20,200
畑地	2,939	77	21,100	5,960
市街地	4,645	294	11,400	47,200
重相関係数	0.898	0.772	0.900	0.904

2-2 Logistic Regression Model

EUには河川水質の基準に関して Water Framework Directive (即ち Q 値 ≥ 4) がある。Water Framework Directive は “good ecological status” の達成を要求している。本研究は土地利用面積比率と河川水質のデータから簡単なモデルを使用することによって、この “good ecological status” を達成できる確率を予測しようとするものである。詳細を表2に示す。

表2 Logistic Regression Model の詳細

独立変数	モデル	R ²
市街地 (%)	$y = -0.52 - 1089 \ln(x)$	0.93
牧草地 (%)	$y = 44.84 + 186.81x - 261.69x^2$	0.75
耕地 (%)	$y = 20.87 - 37.79x + 15.63x^2$	0.35
MRP (μ g/L)	$y = 12.6 - 30.77 \ln(x)$	0.81
電気伝導度 (μ S/cm)	$y = 593.96 + 356.67 - 1026.6x^2$	0.79
アンモニア濃度 (μ g/L)	$y = 7.57 - 74.67 \ln(x)$	0.74

このモデルを使用して、アイルランド国内の 797 の水文学的に独立した河川の合計 2,548 の観測点で調査が行なわれた。その結果、これらのモデル式によって得られる確率分布から得られる土地利用と水質の適性値は、集水域のリスク管理と計画立案のよい手段となること、このままの土地利用が続けば WFD の達成は非常に困難であることが予想されること、農業から排出される汚濁負荷の大幅な削減のための手段の開発が必要とされていること、WFD の要求している河川水質の回復と維持のためには更に注意深い土地の利用が必要であることが判明した。

[考察]

本モデルについての考察を以下に箇条書きに挙げる。

- (i) 本論文での Water Framework Directive、Q 値、good ecological status の内容は判明しなかった。
- (ii) 日本では、リンは土壌中の金属イオンと反応して土壌中に留まる割合が高いため、汚濁物質の水系への流出機構を解明するうえであまり適当な指標とは考えられてはいないが、EU では水質項目のうち TP が重視されている。これはリン鉱石の枯渇問題が世界規模で深刻

化している事態を反映したものと考えられる。

アイルランドでのリンの基準は、

河川：懸濁態 MRP で $30 \mu\text{g/L}$

湖沼：TP で $20 \mu\text{g/L}$

である。

(iii) 各モデル式によって算出された値を、good ecological status を達成できる確率へと変換するためのモデルの提示がないために、この部分は不明である。

(iv) 近年、日本では面源対策の重要性が強調されているが、EU でも農業から排出される汚濁負荷が問題となっている。

2-3 流域・水質評価モデル

浜端等は 1978 年 6 月末から 1 年間毎週採水を行い、13 項目の水質測定結果（水質変数）の年間平均値と、流域内の人口密度、都市・居住地域率、工場密度、工業生産密度、農耕地率、マツ林率、草原率、植林率、天然林率、全森林率の 10 指標（流域変数）との間の相関係数を求め、各水質変数ごとに強い正相関と強い負相関を持つ流域変数を選択して重回帰分析を行い、各物質ごとの濃度を推定する重回帰式を求めた。その結果、高い重相関係数を得られた重回帰推定式は森林が卓越する大河川に偏っていて、それに対して、大河川の伏流水が水源となっていたり、高度に施設化された水田地帯の中の河川で人為的に農業用排水として水が供給されるような、また、水道水起源の排水が最低流量を保障しているような、平野部や都市部の中小河川の水質予測には適さない可能性が高いとしている⁶⁾。

3 各水系の水質の状況と流域の概況

群馬県内の西毛地方を構成する各水系の水質の状況を表 3 に、流域の概況を表 4 に、平成 14 年の TN の平均値を表 5 に示した。

表 3 各水系の水質の状況

番号	調査地点	水系	BOD 濃度	水質評価	関係自治体
①	烏川橋	烏川	$0.5^{\text{[mg/L]}}$	AA	倉渕村
②	鼻高橋	碓氷川	2.3	B	安中市、松井田町
③	鐺川橋	鐺川	1.5	A	南牧村、下仁田町、妙義町、富岡市、甘楽町、吉井町、藤岡市
④	神流川橋	神流川	0.9	AA	上野村、鬼石町、中里村、万場町
⑤	浜井橋	井野川	5.8	D	箕郷町、群馬町

平成 16 年度版群馬県統計年鑑より作成、関係自治体は平成 16 年の時点による

4 解析結果

4-1 海老瀬モデルによる解析

(1) 6指標による解析

群馬県内の利根川上流部を構成する烏川、碓氷川、鎭川、神流川、井野川、の各河川の水質の現況と流域の概況は、表3、表4のようである。表4によれば、流域の概況を示す指標として、流域面積、人口密度、工場出荷額、養豚密度、農地率、林野率、下水道普及率、の7指標が与え

表4 各水系の流域の概況

	水 系				
	烏川	碓氷川	鎭川	神流川	井野川
流域面積 [km ²]	127.26	276.34	674.51	349.00	65.70
人口密度 [人/km ²]	37	233	254	35	839
工場出荷額 [億円/km ²]	0.43	9.40	7.40	0.52	7.90
養豚数 [頭/km ²]	0	34.4	40.9	0.6	236.7
農地率 [%]	3.50	7.81	7.32	0.52	20.19
林野率 [%]	85.16	60.00	62.82	88.70	34.14
下水道普及率 [%]	0	12.53	23.35	0	21.62

平成16年度版群馬県統計年鑑より作成

られているが、これらの各指標が水質に与える影響の大きさを見るために、重回帰分析の手法によって解析を試みた。なお、表3にはBOD濃度が報告されている。海老瀬の重回帰式の目的変量は比流出負荷量であるが、比流出負荷量の代替値としてTN濃度を使用した。

表5 各水系の平成14年のTNの平均値

水 系	TN [mg/L]
烏川	1.5
碓氷川	2.7
鎭川	2.9
神流川	1.6
井野川	5.3

重回帰分析の結果

今回は、標本数5、目的変量は各河川の水質(TN濃度mg/L)、説明変数数6、として、求める重回帰式を

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6$$

として解析をおこなった。表8に目的変量と説明変量のデータを示す。

次に、回帰係数 b_1 を $\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y}$ を解くことによって求めた。求められた重回帰式は

$$Y = 4.2440 + 0.0082x_1 + 0.0781x_2 + 0.0116x_3 + 0.6328x_4 - 2.9902x_5 + 0.0107x_6$$

となった。河川水のTN濃度への寄与度では、農地率が最も大きく次いで工場出荷額、養豚密度、

人口密度の順だったが、寄与度がマイナスになるはずの下水道普及率がプラスという結果となった。

表6 標本番号の詳細

標本番号	対応する水系
1	烏川
2	碓氷川
3	鎚川
4	神流川
5	井野川

表7 説明変量の詳細

番号	内容
x ₁	人口密度 [人/km ²]
x ₂	工場出荷額 [億円/km ²]
x ₃	養豚数 [頭/km ²]
x ₄	農地率 [%]
x ₅	林野率 [%]
x ₆	下水道普及率 [%]

また、林野率は非常に大きなマイナスの値となった。このことは林野面積が大きいほど水質が改善されることを示している。

有意性の検定

求められた重回帰式の有意性の検定を重相関係数による方法で行った。結果は、

$$R^2 = 8.0498$$

となり、有意性を実証できなかった。

表8 目的変量と説明変量のデータ

標本番号	目的変量	説明変量					
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆
1	1.5 ^[mg/L]	37	0.4	0	3.5	85.16	0
2	2.7	233	9.4	34.4	7.81	60.00	12.53
3	2.9	254	7.4	40.9	7.32	62.82	23.35
4	1.6	35	0.5	0.6	0.52	88.70	0
5	5.3	839	7.9	236.7	20.19	34.14	21.62

(2) 4指標による解析結果

次いで、海老瀬のスキームにならい、5水系を烏川・神流川のグループ、碓氷川・鎚川のグループ、井野川の3グループに分けて解析した。烏川・神流川グループと碓氷川・鎚川グループとは水系内の下水道の有無によって分けた。また、水系内に下水道が存在しかつ大点源が存在している井野川はやはり別のグループとした。それぞれのグループについて水田率、畑地率、林野率、市街地率、を調査して重回帰式を求めた。なお、統計に表れる各市町村の全体の面積と4つの土地利用形態のそれぞれの面積の合計値とはかなりの違いがあるが、流域はこの4つの土地利用形態のみで構成されているものと見なして、面積比率を再配分したものを利用した⁷⁾。また、井野川水系のグループについては今回は調査河川が1本だけのため、重回帰分析による解析を行わなかった。

(i) 烏川・神流川グループ

求められた重回帰式は、

$$Y = 1.62333 - 5.54648x_1 + 0.04379x_2 - 0.8926x_3 - 0.03584x_4 \quad (1)$$

となった。汚濁物質の排出源である水田と市街地の係数がマイナスとなっている。林野については、文献値の通り小さなマイナス値となっている。重相関係数を用いた有意性の検定では、

$$R^2 = 0.48784$$

となった。

表9 烏川・神流川グループの流域の土地利用形態別面積比率

	水田 (%)	畑地 (%)	市街地 (%)	林野 (%)
	x_1	x_2	x_3	x_4
烏川水系	1.33	2.54	1.68	94.43
神流川水系	0	0.52	1.70	97.78

(ii) 碓氷川・鎭川グループ

求められた重回帰式は、

$$Y = -0.82971 + 0.952196x_1 + 3.05088x_2 - 6.96091x_3 + 5.673169x_4 \quad (2)$$

となった。この式では、汚濁物質の排出源であるはずの市街地で値はマイナスとなり、水質の改善をもたらすはずの林野でプラスの値となった。重相関係数を用いた有意性の検定では、

$$R^2 = 1.85962$$

となり、有意性を実証できなかった。

表10 碓氷川・鎭川グループの流域の土地利用形態別面積比率

	水田 (%)	畑地 (%)	市街地 (%)	林野 (%)
	x_1	x_2	x_3	x_4
碓氷川水系	3.82	6.41	11.07	78.69
鎭川水系	3.73	5.67	9.89	80.70

4-2 流域・水質評価モデルによる解析結果

(1) 流域変数相互間の相関

浜端等の流域・水質評価モデルのスキームに基づき、表4に掲げた7指標間の相関関係をもとめて、表11に示した。これらの中で、正の相関が高く0.9を超えるものは人口密度と養豚密度、人口密度と農地率、養豚密度と農地率であり、0.8を超えるものは工場出荷額と下水道普及率である。高い正の相関があると予想される人口密度と工場出荷額は0.6262に止まっていて、このことは工場の分散と労働力の移動性の高さを示していると考えられる。

一方、負の相関が高く-0.9を超えるものは人口密度と林野率、養豚密度と林野率、農地率と林

野率であり、-0.8を超えるものは工場出荷額と林野率、林野率と下水道普及率である。こうして見ると経済開発と自然の存在とが二律背反の関係にあることが明瞭である。

表 11 流域変数間の相関関係

	I	II	III	IV	V	VI	VII
I 流域面積	※	-0.3484	0.1666	-0.4274	-0.3763	0.2005	0.3219
II 人口密度	-0.3484	※	0.6262	0.9914	0.9874	-0.9520	0.7343
III 工場出荷額	0.1666	0.6262	※	0.5218	0.6724	-0.8305	0.8556
IV 養豚数	-0.4274	0.9914	0.5218	※	0.9702	-0.9053	0.6504
V 農地率	-0.3763	0.9874	0.6724	0.9702	※	-0.9689	0.7473
VI 林野率	0.2005	-0.9520	-0.8305	-0.9053	-0.9689	※	-0.8528
VII 下水道普及率	0.3219	0.7343	0.8556	0.6504	0.7473	-0.8528	※

(2) 水質と流域変数との相関

次いで水質と流域変数との間の相関関係を求め、結果を表 12 と図 1～図 4 に示した。この結果によれば、人口密度、養豚密度、農地率の相関係数はほぼ 1 に近く、河川の水質に非常に大きな影響を与えていることを示している。一方、流域面積と林野率はマイナスの値となって、流域面積、林野率が大きいほど河川の水質は改善されることを示している。特に林野率の相関係数はほぼ -1 に近い。注目されるのは下水道普及率の 0.798 である。本来下水道は汚濁物質を人為的に浄化するための施設であるから、マイナスの値となってもよいと考えられるが、下水道が普及している地域は都市化の進んだ地域であるので、市街地からの汚濁負荷が下水道の浄化力を上回っているのかもしれないと考えられる。

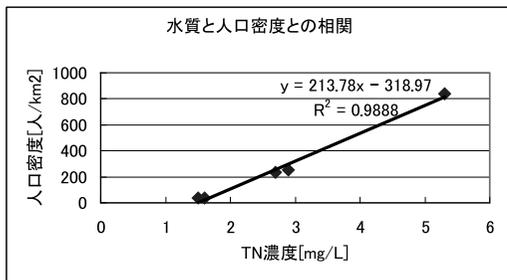


図 1 水質と人口密度との相関

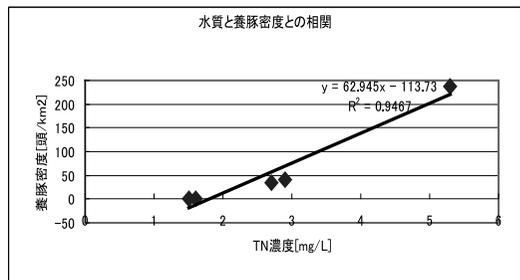


図 2 水質と養豚密度との相関

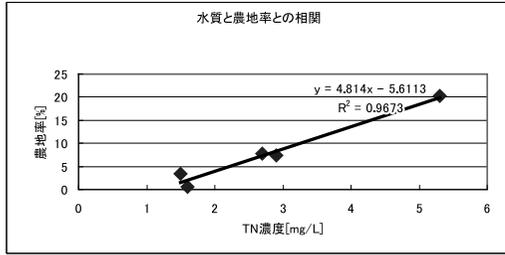


図3 水質と農地率との相関

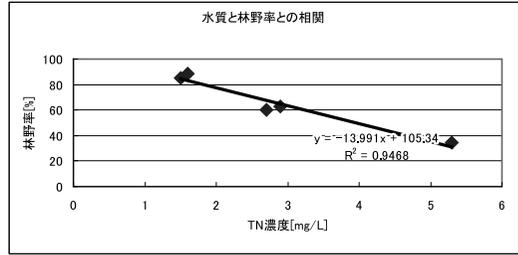


図4 水質と林野率との相関

(3) 水質と流域変数との重相関

水質と高い相関関係を持つと考えられる流域変数を選んで重回帰分析を行った。その結果、高い重相関係数を得られた重回帰式は、

$$Y = 2.5886 + 14.5769x_1 - 1.5500x_2 + 1.0106x_3 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9799$$

x_1 : 農地率、 x_2 : 林野率、 x_3 : 下水道普及率

である。本式では農地率の影響が大きいことが示されて

いる。林野率は文献値のように小さなマイナスの値となっている。また、① 人口密度、養豚密度、農地率 ② 人口密度、養豚密度、農地率、林野率、で試みたが、いずれも有意性を得られなかった。

表12 水質と流域変数との相関

流域変数	TN
流域面積	-0.260
人口密度	0.994
工場出荷額	0.695
養豚数	0.973
農地率	0.984
林野率	-0.973
下水道普及率	0.798

5 結論

海老瀬モデルと浜端モデルに基づき流域の土地利用状況と河川水質との関係について検証した。今回の両モデルの援用に当たってはその相違点として、

- (1) 海老瀬モデルではその目的変数が降雨時を含む比流出負荷量であるのに対して、浜端モデルは河川水質濃度である。
- (2) 海老瀬モデルでは流域変数が水田率、畑地率、市街地率のみで、工場排水や下水処理場等の大点源の有無によって解析対象を区分しているが、浜端モデルではそれ等を含めて7変量を指標として用いている。

ことが挙げられる。

今回は高崎市の実施している月1回の水質測定結果を使用した。自治体の実施する水質測定は通例、降雨後数日して河川流量が安定した時の非降雨時に行われている。この意味で非降雨時流出の水質濃度に海老瀬モデルを適用することには少々無理があったと考えられる。しかし、表9、表10を見ると、各水系の流域変数間にそれほど違いが見られないので、目的変数を比流出負荷量

にするなどして海老瀬モデルのスキームを厳密に適用すれば、高い精度の重回帰式が得られることが推測される。

一方、浜端モデルでは高い精度の重回帰式が得られたが、単独ではそれぞれ水質と高い相関関係を示す流域変数をいくつか組み合わせても、高い精度の重回帰式が得られないという結果となった。このことは、農地ではその内容が水田であるのか畑地であるのか、畑地であればその作目はどうか、人口密度では下水道が存在するのかわからないのか、存在するとしてもその処理水が水系内に放流されているのか、それとも流域下水道で汚水が水系外へ出てしまうのか、養豚密度ではその糞尿の堆肥化率や処理方法など、細かく条件を検討しなければならないことを示していると考えられる。

得られた重回帰式（3）の流域変数は農地率、林野率、下水道普及率であるが、下水道普及率は、表 11 で示すように工場出荷額、人口密度と高い相関関係を持つことを考慮すると、市街地率と高い相関があると考えられ、そのことは本式がとりまなおさず海老瀬の推定式に近いものであることを示す結果となった。また、浜端モデルは平野部の中小河川には適用が困難であるとの指摘があるが⁸⁾、今回得られた重回帰式（3）は平野部の中小河川である井野川水系へも適用可能であることを示しており、海老瀬モデルと浜端モデルの近似性の確認と併せて新発見が得られたと考えられる。

（むとう かんいち・高崎経済大学大学院地域政策研究科博士後期課程）

註

- 1) 吉良竜夫、山倉拓夫、浜端悦治、吉岡龍馬「びわ湖流入河川の水質と流域状況の相関関係（予報）」環境科学研究報告集、B-105-R12-12（昭和55年度）、1981年、PP66-71
- 2) 海老瀬潜一「流域内土地利用形態別流出負荷原単位の解析」国立公害研究所研究報告第50号、1984年、PP89-102
- 3) Ian Donohue, Martin L. McGarrigle, Paul Mills: Linking catchment characteristics and water chemistry with the ecological status of Irish rivers, Water Research 40, 2006, p91-98
- 4) 群馬県環境保全課『平成14年度水質測定結果』2003年
海老瀬の重回帰推定式の目的変数は各河川の比流出負荷量であるが、本稿では河川水質濃度で試みた。用いたのは、各河川のTNの平成14年の年間の平均値である。
- 5) 前掲2)、pp95
- 6) 國松孝男、村岡浩爾『河川汚濁のモデル解析』技報堂出版、2002年、193頁
- 7) 前掲2)、pp93
- 8) 前掲6)