

河川の流出特性に関する解析*

—十勝川の流出負荷量原単位—

棗 庄 輔**・有 朱 二 郎**・伊 藤 英 司**

1. はじめに

河川の水質汚濁現象は種々多様な因子によって構成されており、すべての因子を追跡してその機構を解明することは極めて困難である。したがって、多くの成書は、評価目的によって場を設定し、現象のモデル化や機構の解説を行っている^{1)~3)}。

著者らは、道内の主要河川を対象に、環境基準未達成の原因や水質変動の要因について解析し、水質汚濁現象がどのような機構の下で発現するかについて考察を試みてきており^{4)~7)}、河川の流出特性に関しては、調査回数が年数回という体制のもとでどのような手法で解析するかを検討し、流域単位面積当たりの流出負荷量（以下「流出負荷量原単位」と称する。）によってマクロ的に表現することにした。

流域からの流出負荷量は、その面源の立地する水文、気象、地形・地質や種々の人間活動等の環境条件に支配され、特に晴天時と降雨時でその様相が大きく異なることを多くの研究者によって示されている^{8)~11)}。しかしながら、降雨時における面源からの流出汚濁現象を把握するうえで、降雨前から降雨後までの連続観測という調査体制を整えることは極めて困難である。このため、流出負荷量原単位を統計的な平均量として取り扱うことにし、調査としては、広域を対象に土地利用形態の異なる多地点を選定し、同日観測を基本にした定期的な水質・水量の観測を実施した。

対象河川である十勝川は、近年、その地先海域において、夏期から秋期にかけて赤潮が発生することもあり、漁業への影響が懸念されるようになってきている¹²⁾¹³⁾。赤潮発生メカニズムは不明であるが、今後、地先海域の水環境保全を論じる場合、十勝川から供給される

汚濁物質が地域開発等によって量的、質的にどのような変化を示すかを予測することは重要な課題の一つである。

したがって、本報告の目的は、地先海域の水質を予測し、制御を考えるうえで、最も基本的、かつ重要な十勝川の流出負荷量原単位を河川流量、土地利用形態等の簡単な情報から重回帰式で表現し、流出負荷量の予測式を水質管理のサブシステム、たとえば赤潮発生予報システムの一つの要素として導入しようとするものである。

手法としては、種々の土地利用形態を擁する主要地点（本流7地点、支流32地点）を対象に、昭和62年度から平成2年度までの4年間に晴天時、雨天時を問わず赤潮が発生する時期の7月～11月に実施した観測結果（516検体）を基に、BOD、COD、T-N、T-Pの流出負荷量原単位については流域単位面積当たりの流量（以下「比流量」と称する。）と土地利用面積比率及び降雨時等の影響が端的に現われ、自動観測（濁度換算）が可能な流域単位面積当たりのSS量（以下「比SS量」と称する。）の3項目を、SSの流出負荷量原単位については比流量、土地利用面積比率の2項目をそれぞれ説明変数とした重回帰式で表現し、その妥当性を公共用水域の測定結果という新たな場において検証した。

2. 調査の概要

2・1 十勝川流域の概略

十勝川はその源を大雪山連峰十勝岳（標高2,077 m）に発し、広大な十勝平野の西北端へ出て、佐幌川、芽室川、美生川、然別川等を合わせ帯広市に達し、さら

* Analysis on Runoff Characteristics in River-Runoff Loads in Tokachi River-

** Syosuke NATSUME, Jiroh ARISUE, Hideshi ITOH（北海道環境科学研究センター）Hokkaido Institute of Environmental Sciences

に音更川、札内川、土幌川、猿別川、利別川等を合流しながら、中川郡豊頃町大津において太平洋に注ぐ流路延長 156 km、流域面積 9010 km² を有する道内第 2 の大河川である。

2・2 調査の方法

本調査は多地点同日観測を原則にした水質・水量の観測調査であり、昭和62年度から平成 2 年度まで実施した。調査地点は、土地利用形態等の流域特性から、本流は、上流から下流までの流下過程における主要な 7 地点を、支流は、各支流の末流点を含む 32 地点を選定した。調査時期は地先海域で赤潮が発生する 7 月下旬から11月上旬までとし、調査回数を 3～4 回/年とした。

図 1 に十勝川流域の概略と調査地点を、表 1 に調査

地点の土地利用形態を示す。

水質分析は、BOD、COD、SS を JIS K 0102、T-N、T-P をオートアナライザーの比色法によって測定した。

2・3 解析の方法

解析資料は、十勝川本流（7 地点）112 検体及び支流（32 地点）404 検体、計 516 検体である。図 2 は各項目の流出負荷量原単位 (g/sec/km² : 以下「比 BOD 量, 比 COD 量, 比 SS 量, 比 T-N 量, 比 T-P 量」と称する。) 及び比流量 (m³/sec/km²) の累積相対度数を対数正規確率紙に表わしたものである。各項目とも対数正規分布を示すことから一つの母集団と考え、全資料を総合的に解析し、各項目の流出負荷量原単位について比流量 (m³/sec/km²) 及び土地利用面積比率 (%)



図 1 十勝川流域の概略と調査地点

表1 調査地点の流域面積と土地利用形態

地点番号	河川名	地点名	流域面積 km ²	森林 面積 %	田畑荒地 面積 %	市街地 面積 %
1	十勝川本流	茂岩橋	8033	65.2	31.8	0.93
2	"	千代田堰堤	4465	59.4	37.1	1.35
3	"	十勝大橋	2513	64.6	33.2	0.88
4	"	中島橋	1665	75.2	22.8	0.72
5	"	祥栄橋	1440	77.5	21.3	0.51
6	"	十勝橋	1237	80.3	17.6	0.48
7	"	清水大橋	848.3	84.1	14.7	0.13
①	牛首別川	農野牛橋	175.9	79.6	19.4	0.06
②	利別川	川合橋	2842	80.3	18.2	0.34
③	猿別川	止若橋	441.0	31.7	66.1	0.94
④	途別川	千住橋	120.1	21.6	75.0	1.73
⑤	札内川	礼内橋	706.2	63.6	31.0	1.47
⑥	士幌川	旭橋	224.4	20.8	76.8	0.90
⑦	" 支流	九線橋	11.9	7.6	92.4	0.00
⑧	音更川	十勝新橋	589.7	66.2	30.5	0.74
⑨	" 支流	鈴蘭橋	17.1	7.6	80.7	11.7
⑩	" 支流	新富橋	14.6	8.9	91.1	0.00
⑪	" 支流	白鳥橋	23.7	15.6	84.4	0.00
⑫	帯広川	十勝合流前	187.9	20.1	69.1	9.42
⑬	然別川	国見橋	633.1	49.2	49.5	0.44
⑭	" 支流	駒止橋	19.9	31.1	68.9	0.00
⑮	" 支流	堀下橋	7.6	20.9	79.1	0.00
⑯	美生川	美生橋	206.0	65.3	29.4	0.60
⑰	"	新生橋	184.5	72.7	25.8	0.35
⑱	"	上美生橋	160.8	81.3	17.0	0.00
⑲	"	西伏美橋	89.9	100.0	0.0	0.00
⑳	" 支流	第3号橋	16.4	100.0	0.0	0.00
㉑	" 支流	柏橋	4.5	100.0	0.0	0.00
㉒	ピウカ川	元町橋	18.1	8.3	72.9	18.8
㉓	芽室川	毛根中島橋	212.7	57.6	41.4	0.65
㉔	小林川	讀岐橋	38.0	83.2	16.5	0.23
㉕	"	小林橋	32.1	81.9	18.1	0.00
㉖	"	上平和橋	26.4	97.7	2.3	0.00
㉗	" 支流	御影平和橋	6.6	100.0	0.0	0.00
㉘	" 支流	南清水橋	4.6	23.9	76.1	0.00
㉙	佐幌川	佐幌橋	336.3	73.4	24.9	1.40
㉚	"	清水橋	261.1	75.7	23.2	0.79
㉛	" 支流	公園橋	6.4	39.1	60.9	0.00
㉜	" 支流	新清橋	36.7	89.6	10.4	0.00

を説明変数とした重回帰式で表現した。

3. 重回帰分析結果

2項目間の相関関係の例として、各項目の流出負荷量原単位 (g/sec/km²: 比BOD量, 比COD量, 比SS量, 比T-N量, 比T-P量) と比流量 (m³/sec/km²) との関係を散布図に示すと図3のようである。

各項目の流出負荷量原単位と比流量との相関係数 (r) は、BOD (r=0.85), COD (r=0.84) が高く、次いでSS (r=0.70) となり、T-N (r=0.57) 及びT-P

(r=0.59) は低い傾向を示した。

表2に全調査項目の相関行列を示す。表は対角線に関して対称であり、右上半部分について相関係数の絶対値が0.7以上の値をゴチック体と下線で示した。すなわち、[森林面積比率]と[畑地(田畑・荒地)面積比率]が、[比流量]と[比SS量], [比BOD量], [比COD量]の3者が、[比SS量]と[比BOD量], [比COD量], [比T-P量]の3者が、[比BOD量]と[比COD量], [比T-P量]の両者が、[比T-P量]と[比COD量], [比T-N量]の両者がそれぞれ高い相関

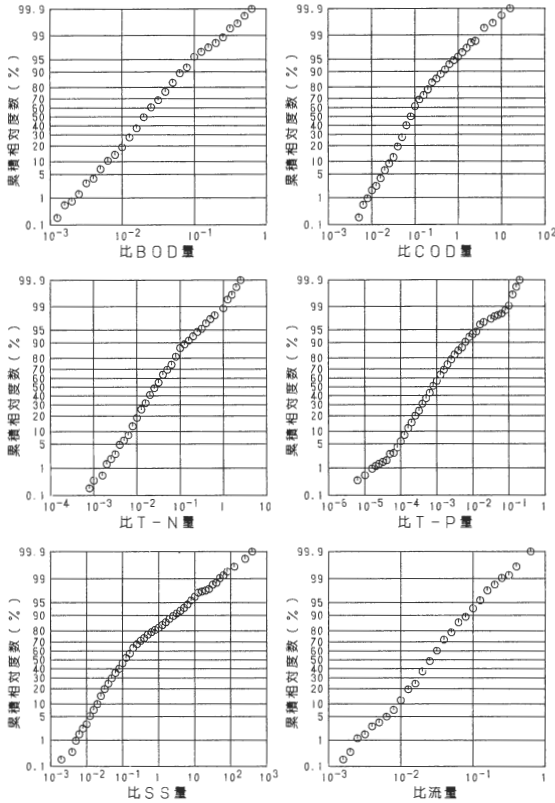


図2 流出負荷量原単位及び比流量の累積相対度数

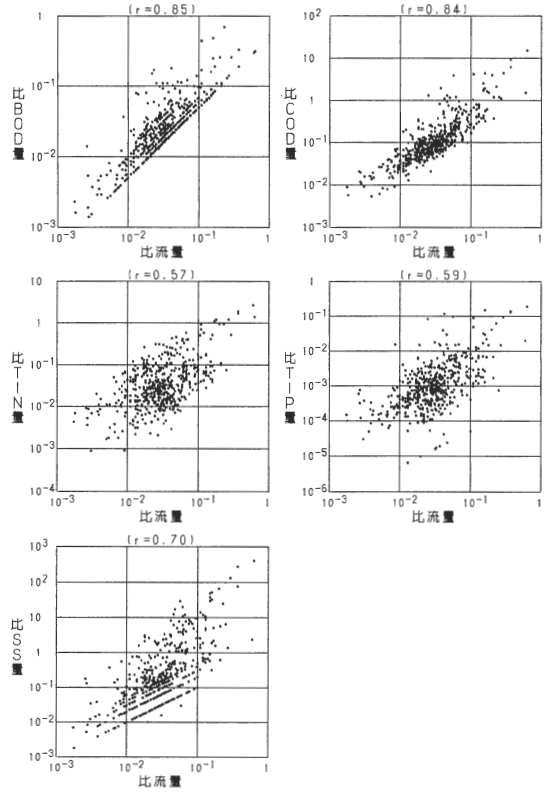


図3 流出負荷量原単位と比流量との関係

表2 2項目間の相関係数

	森 林 面積比率	畑 地 面積比率	市街地 面積比率	比 流 量	比SS量	比BOD量	比COD量	比T-N量	比T-P量
森 林	----	<u>-0.99</u>	-0.39	0.32	0.04	0.09	0.10	-0.47	-0.16
畑 地	-0.99	----	0.30	-0.32	-0.04	-0.11	-0.10	0.45	0.14
市街地	-0.39	0.30	----	-0.04	0.03	0.22	0.02	0.31	0.21
比 流 量	0.32	-0.32	-0.04	----	<u>0.70</u>	<u>0.85</u>	<u>0.84</u>	0.57	0.59
比SS量	0.04	-0.04	0.03	0.70	----	<u>0.74</u>	<u>0.88</u>	0.60	<u>0.78</u>
比BOD量	0.09	-0.11	0.22	0.85	0.74	----	<u>0.85</u>	0.66	<u>0.74</u>
比COD量	0.10	-0.10	0.02	0.84	0.88	0.85	----	0.65	<u>0.80</u>
比T-N量	-0.47	0.45	0.31	0.57	0.60	0.66	0.65	----	<u>0.70</u>
比T-P量	-0.16	0.14	0.21	0.59	0.78	0.74	0.80	0.70	----

関係を示した。

ここで、2項目間の相関関係をもとに、重回帰式における最適変数の組み合わせを変数増減法で求めた。すなわち、なるべく少ない変数で、かつ、寄与率がすべての変数を用いた場合に比べて有意の差（危険率

0.05)がない変数の組み合わせについて検討した。手順としては、残差平方和の減少量と残差分散の比がF分布を示すことから、変数のF値が $F_0 = 3.84 [F(1, \infty, 0.05)]$ より大きい場合はその変数を重回帰式に取り入れる。次に、新たな変数を取り入れて再計算し、F

表3 流出原単位と各説明変数との重相関係数

説明変数	比流量	比流量 比森林	比流量 比市街地	比流量 比森林	比流量 比市街地	比流量 比SS量 比森林	比流量 比SS量 比市街地	比流量 比SS量 比森林	比流量 比SS量 比市街地
比BOD量	0.85	0.87	0.88	0.89	0.87	0.88	<u>0.90</u>	0.90	
比COD量	0.84	0.86	0.84	0.86	0.93	<u>0.94</u>	<u>0.94</u>	0.94	
比T-N量	0.57	0.89	0.66	0.89	0.64	0.89	0.71	<u>0.90</u>	
比T-P量	0.59	0.70	0.64	0.70	0.78	<u>0.82</u>	0.80	0.82	
比SS量	0.70	<u>0.73</u>	0.70	0.73	----	----	----	----	

値がFoより小さくなった場合はその変数を取り除く。この操作を繰り返し取り入れる変数がなくなった時に計算を終了させた。

この結果、BOD、COD、T-N、T-Pの流出負荷量原単位に関する各説明変数を、[比流量]、[森林面積比率]、[市街地面積比率]、[比SS量]の4項目として解析した。また、SSの流出負荷量原単位は、[比流量]、[森林面積比率]、[市街地面積比率]の3項目を説明変数とした。

なお、畑地(田畑・荒地)面積比率は森林面積比率と強い相関関係($r = -0.99$)にあるので説明変数から除いた。

これらの説明変数は、十勝川地先海域での赤潮発生予報を可能にするうえで、その構成要因の一つとして十勝川の流出負荷量を導入する場合、自動的にプログラム化し得る要素である。すなわち、流量、SS(濁度換算)については自動記録計から入力が可能であり、森林面積比率と市街地面積比率は予めデータを入力し

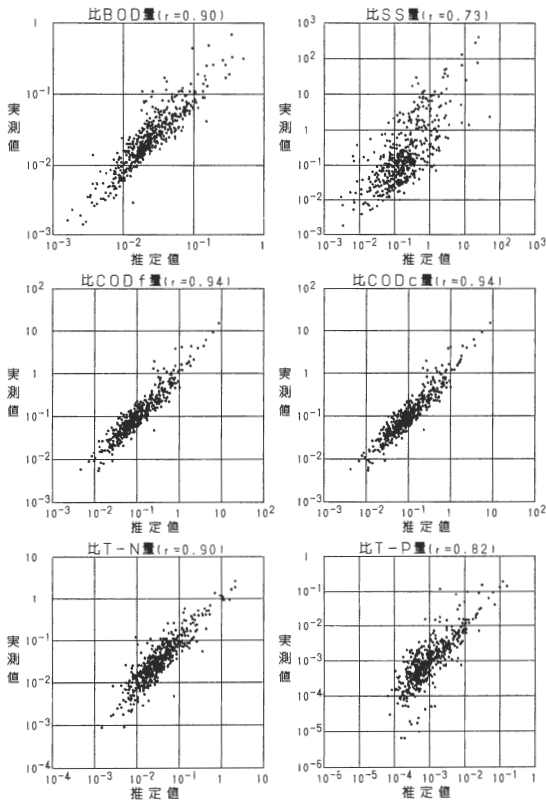


図4 重回帰式による推定値と実測値の関係

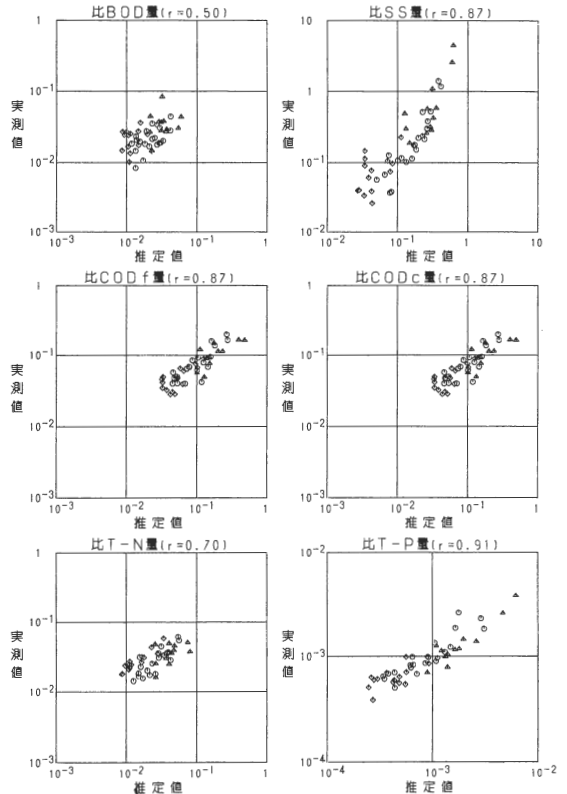


図5・1 十勝大橋における追跡結果
(△: 4~6月, ○: 7~11月, ◇: 12~3月)

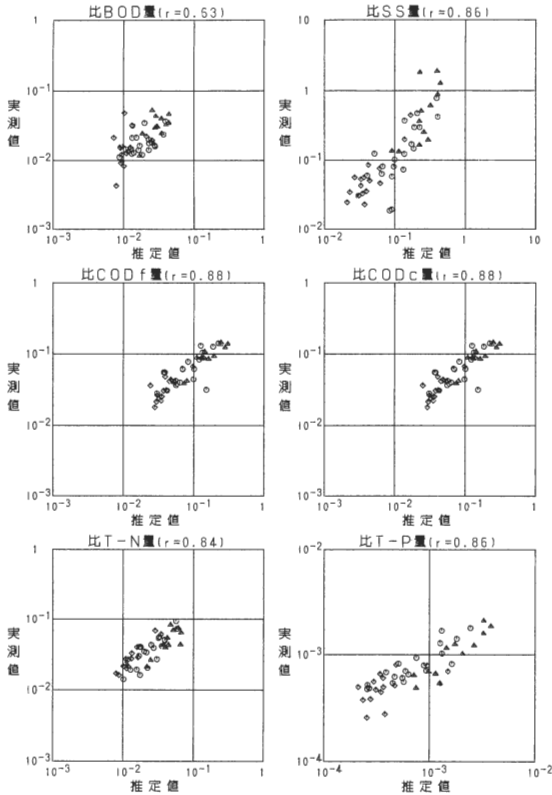


図5・2 千代田堰堤における追跡結果
(△: 4~6月, ○: 7~11月, ◇: 12~3月)

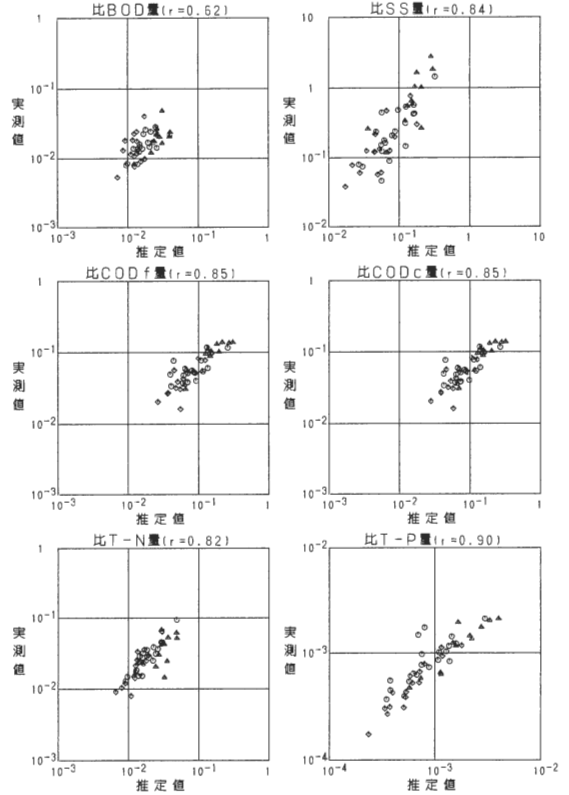


図5・3 茂岩橋における追跡結果
(△: 4~6月, ○: 7~11月, ◇: 12~3月)

得る。

重回帰分析の重相関係数は表3のとおりであり、表中で下線をした組合せの重回帰式を下記に示す。

(1)BOD 流出負荷量原単位 [比 BOD 量]

$$\text{○log (比 BOD 量)} = -0.470 + 0.722 \times \text{log (比流量)} + 0.124 \times \text{log (比 SS 量)} + 0.0319 \times \text{log (市街地面積比率)} \dots\dots\dots (r = 0.90)$$

(2)COD 流出負荷量原単位 [比 COD 量]

$$\text{○log (比 CODf 量)} = 0.316 + 0.631 \times \text{log (比流量)} + 0.327 \times \text{log (比 SS 量)} - 0.00138 \cdot \text{log (森林面積比率)} \dots\dots\dots (r = 0.94)$$

$$\text{○log (比 CODc 量)} = 0.157 + 0.576 \times \text{log (比流量)} + 0.343 \times \text{log (比 SS 量)} + 0.00265 \times \text{log (市街地面積比率)} \dots\dots\dots (r = 0.94)$$

(3)T-N 流出負荷量原単位 [比 T-N 量]

$$\text{○log (比 T-N 量)} = 0.804 + 0.951 \times \text{log (比流量)} + 0.099 \times \text{log (比 SS 量)} - 0.0129 \times \text{log (森林面積比率)} + 0.0125 \times \text{log (市街地面積比率)} \dots\dots\dots (r = 0.90)$$

(4)T-P 流出負荷量原単位 [比 T-P 量]

$$\text{○log (比 T-P 量)} = -1.63 + 0.417 \times \text{log (比流量)} + 0.497 \times \text{log (比 SS 量)} - 0.00623 \times \text{log (森林面積比率)} \dots\dots\dots (r = 0.82)$$

(5)SS 流出負荷量原単位 [比 SS 量]

$$\text{○log (比 SS 量)} = 2.23 + 1.690 \times \text{log (比流量)} - 0.00631 \times \text{log (森林面積比率)} \dots\dots\dots (r = 0.73)$$

上述の重回帰式による推定値と実測値との関係を描くと図4のようであり、比 BOD 量、比 CODf 量、比 CODc 量、比 SS 量、比 T-N 量、比 T-P 量の重相関係数はそれぞれ $r = 0.90, 0.94, 0.94, 0.90, 0.82, 0.73$ である。

4. 重回帰式の評価

多くの地点のデータを総合し、統計的に処理する場合、どの程度の相関係数が現象を記述したといえるかは非常に難しい課題である。本報告では、著者らが実施した水質・水量の観測結果をもとにして得られた重回帰式を他機関が実施している公共用水域の測定結果という新たな場において適合するか否かによって評価することにした。

すなわち、重回帰式による推定値と昭和62年度から

平成2年度までの十勝川本流の3地点（十勝大橋，千代田堰堤，茂岩橋）における実測値（△：4～6月，○：7～11月，◇：12～3月）を適合させた。

フィッティングの追跡結果を示すと図5・1（十勝大橋），5・2（千代田堰堤），5・3（茂岩橋）のようであり，比BOD量，比CODf量，比CODc量，比SS量，比T-N量，比T-P量についての推定値と実測値の相関係数はそれぞれ $r = 0.50 \sim 0.63$ ， $0.85 \sim 0.88$ ， $0.85 \sim 0.88$ ， $0.84 \sim 0.87$ ， $0.70 \sim 0.84$ ， $0.86 \sim 0.91$ を示した。

このことから，重回帰式は公共用水域の実測値を忠実に追跡するには至らなかったが，十勝川の流出負荷量を巨視的に把握し，予測するには充分有効であることが実証された。

5. おわりに

地先海域で赤潮が発生することもある十勝川を対象に，BOD，COD，SS，T-N，T-Pの流出負荷量原単位について流量や土地利用形態という簡単な情報をもとに統計的な解析を試み，得られた重回帰式を公共用水域測定結果という新たな場で評価した。

この結果，重回帰式は十勝川の流出汚濁現象をマクロ的に表現するうえで有効であり，流出負荷量の時系列的解析を行うことによって，地先海域における赤潮発生予報システムの確立を図るうえで基礎的資料になるものと考えられる。

なお，本報告において多大なご協力をいただいた道環境対策課水質係並びに十勝支庁振興課土地公害係の

みなさまに深謝します。

一参考文献一

- 1) 市川 新「都市河川の環境科学—水質管理計画の考え方—」，培風館，東京，1980。
- 2) 國松孝男，村岡浩爾「河川汚濁のモデル解析」，技報堂，東京，1989。
- 3) 和田安彦「ノンポイント汚染源のモデル解析」，技報堂，東京，1990。
- 4) 伊藤英司，安藤和夫，中村俊男：水質基準監視地点における河川水質の変動について，土木学会第26回年次学術講演会講演集，pp. 555-558，1971。
- 5) 小西一夫，伊藤英司，有末二郎他：工場・事業場が河川水に及ぼす影響について—河川水質の評価—，北海道公害防止研究所報，No. 10，pp. 93-104，1983。
- 6) 伊藤英司，有末二郎：十勝川の水質・水量変動現象，北海道公害防止研究所報，No. 14，pp. 63-65，1984。
- 7) 伊藤英司，有末二郎，藺庄輔：常呂川におけるBOD流出モデル，北海道公害防止研究所報，No. 16，pp. 45-51，1989。
- 8) Frank X. Browne, Janis B. Orr, Thomas J. Grizzard, Barron L. Weand: Non-point Sources. J. WPCF., 54, No. 6, pp. 755-763, 1982.
- 9) 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，国立公害研究所報告，No. 50，pp. 89-102，1984。
- 10) 松浦茂樹，谷本光司：土地利用と雨天時汚濁流出に関する考察，衛生工学論文集，Vol. 22，pp. 111-122，1986。
- 11) 関根雅彦，浮田正夫，中西弘：連続調査による河川汚濁物質流下機構の検討，衛生工学論文集，Vol. 23，pp. 65-74，1987。
- 12) 「昭和61年度赤潮・特殊プランクトン予察調査報告書」，北海道，1987。
- 13) 「昭和62年度赤潮・特殊プランクトン予察調査報告書」，北海道，1988。