

河川からの汚濁負荷量推定手法に関する一考察

中 島 興 基* ・ 齊 藤 聡**

1. はじめに

UNEP(国際連合環境計画)、WHO(世界保健機関)等が推進する地球環境モニタリングの陸水監視プロジェクト(GEMS/Water)の目的の一つは、河川から海洋への全球的な汚濁物質の流入量(フラックス)を把握することにある。しかしながら、本計画に参加している日本では、限られた河川の流量と汚染物質の濃度を測定しているに過ぎないのが現状であり、より精度の高い汚濁負荷量の算定方法の確立が必要とされている。このため、河川流域から発生する汚濁負荷量と、河川を經由して海域に流入する汚濁負荷量との間の関係などを解析すると共に、データの限られている途上国においてこの手法の応用の可能性を検討することを目的に、平成8年度から4年間のプロジェクトとして、国内の河川を対象としたフラックス解析手法の開発が国立環境研究所地球環境研究センター(担当筆者ら)により行われた。

ここでは、上記プロジェクトの成果をベースとして、流域単位のフラックス算定モデルを構築するために考察した内容を紹介する。なお、本稿の内容が同センターの意見を反映しているものではないことを付言する。

2. 方法

2.1 データ収集および加工

2.1.1 フラックスの概念

一般に、フラックスは、下式により計算される。

$$\text{フラックス} = \text{水質濃度} \times \text{流量} \quad (1)$$

従って、実際のフラックスを算定するためには、流量データおよび水質濃度データを収集・整備することがまず必要である。

さらに、本研究では、複数の河川を対象として、河川によるフラックスの違いが何に起因するのかをみることを目的の1つであるため、各河川流域の諸元データが必要となる。

2.1.2 流量

流量は、測定点やデータソースによって、その条件や性質などがかなり異なる。最適なデータ整備のために必要と考えられる条件は、以下の通りである。

- ・ 位置 … 感潮域を除く最下流部
- ・ 測定状況 … 毎月1回以上
- ・ 水質測定点との一致 … 望ましい

なお、ある時間に測定された流量よりも、1日間または月間の平均流量を用いるほうが、降雨時の効果を取り込むことができるため、望ましい。ある時間の測定流量を用いる場合には、データに以下の換算係数を乗じることにより、降雨時も含めた流量に近くなる。

$$\text{流量換算係数} = 1.1 \quad (2)$$

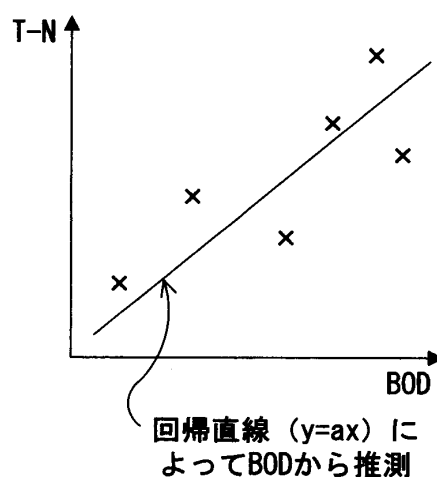


図1 T-NおよびT-Pデータの補完

表1 水質濃度の測定頻度¹⁾

河川名	頻度(回/月)		
	BOD	T-N	T-P
石狩川	2	1	1
十勝川	1~4	1	1
岩木川	1~4	1/2	1/2
北上川	2~5	1/2	1/2
雄物川	2~5	1/2	1/2
阿武隈川	1~4	1/2	1/2
最上川	1~4	1/2	1/2
那珂川	2~4	1/2	1/2
利根川	2~4	1	1
荒川	2	1	1
多摩川	4~8	1	1
阿賀野川	1	1/6	1/6
信濃川	1~2	1/6	1/6
神通川	1	1/3	1/3
九頭竜川	1	1/3	1/6
富士川	2	1/2	1
天竜川	1	1	1
木曽川	1	1/2	1/2
淀川	1	1	1
加古川	1	1	1
大和川	1~14	1~14	1~14
新宮川	1	1/3	1/3
紀ノ川	1	1/3	1/3
千代川	4	1	1
江の川	3~4	0~1/3	0~1/3
高梁川	1	1	1
太田川	4	1	1
吉野川	1~4	1~4	1~4
四万十川	1~4	1/3	1/3
遠賀川	1	1/3	1/3

2.1.3 水質濃度

水質濃度についても、流量と同様に、望ましいと考える測定点、データソースの選択方法がある。

- ・ 項目 … ①BOD(生物化学的酸素要求量)
②T-N(全窒素)
③T-P(全燐)
- ・ 位置 … 感潮域を除く最下流部
- ・ 測定状況 … 毎月1回以上
- ・ 流量測定点との一致 … 望ましい

日本国内の大河川については、BODについては上記基準を概ね満たしているものの、T-NやT-Pについては、2、3ヶ月に1回といった場合が多い(表1参照)。その場合は、「T-NやT-PはBODと正の相関を持つ」という考えにより、下式に従って毎月の値を推定する方法がある(図1参照)。

各河川において、

$$T-N = n \cdot BOD \quad (3)$$

$$T-P = p \cdot BOD \quad (4)$$

2.1.4 河川流域の諸元

河川からの汚濁負荷量推定手法に関する一考察

表 1 水質濃度の測定頻度¹⁾ (続き)

河川名	頻度 (回/月)		
	BOD	T-N	T-P
筑後川	1	1/3	1/3
球磨川	1	1/3	1/3
大淀川	1	1/2	1/2

河川の違いを特徴づける河川流域の諸元については、本調査の分析結果により、人口密度および土地利用のデータ整備が最も必要とされることがわかった。さらには、補助的に用いるものとして、面積、工業出荷額、下水道等の普及率、降雨量が必要となる可能性がある。表2に、説明変数として相応しいか否か、本研究で考える適合性を示す。

それぞれの諸元データについて、データソース

表 2 河川流域の質をあらわす項目

説明変数	単位	適合	備考
人口密度	人/km ²	○	水質悪化の要因
土地利用 率	建物用地	%	○
	森林	%	○
	田	%	×
	畑	%	×
下水道普及率	%	×	効果不明
産業出荷額密度	億円/km ²	△	水質悪化の要因

の形態や性質などが異なるため、使用できる形として整備することが必要となる。特に、土地利用については、地図メッシュデータ「1/10細分区画土地利用データ」(建設省国土地理院)として存在するため、流域内の土地利用種類別の積算を行う。積算方法について、図2に模式的に示す。土地利用のメッシュデータを、流域の境界によって囲い

込むことが必要となる。

2.1.5 河川流域毎のデータ完成

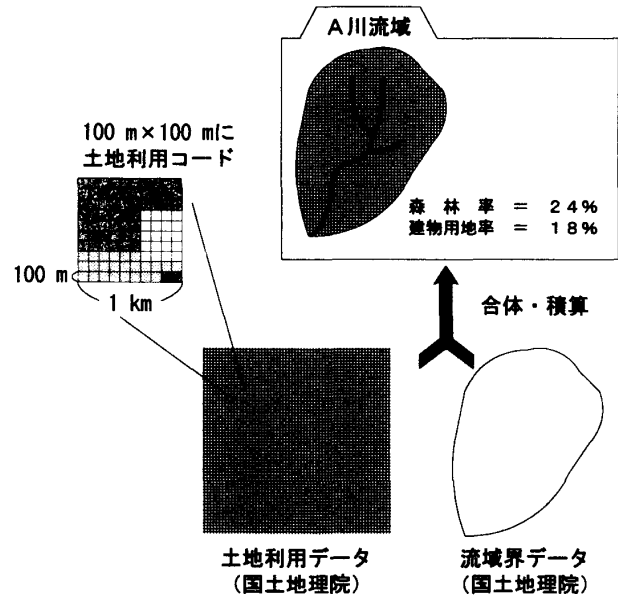


図 2 流域内の土地利用算定

これで、各河川流域について、以下のデータが整備されていることになる。模式図を、図3に示す。

- ① 流量
- ② BOD
- ③ T-N
- ④ T-P(以上、毎月)
- ⑤ 人口密度
- ⑥ 土地利用率
- ⑦ その他

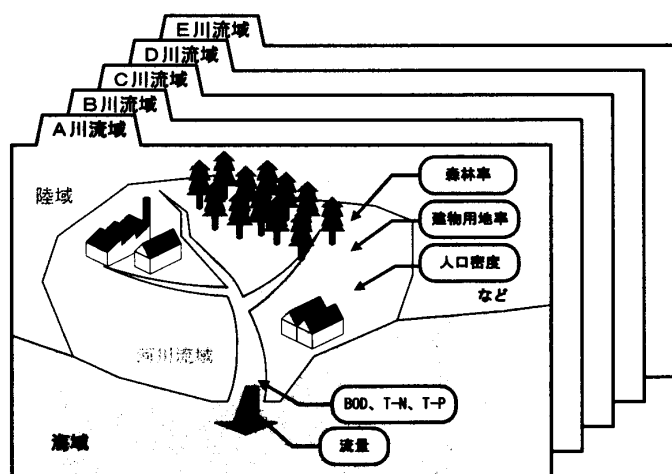


図 3 データ収集・整備のイメージ

2.2 フラックス算定

こうして収集→加工→整備した各種基礎データを基に、次の手順により、手法の検討を行うことができる。

- ① 各河川におけるフラックスの推定
- ② 実測値との比較による結果の評価
- ③ 最適手法の決定

2.2.1 フラックス(実測量)計算

これまでに整備した水質濃度と流量のデータを用いて、各河川について「実測のフラックス」が計算できる。

フラックス(トン/年) =

$$\sum \text{年間(水質濃度(月) (mg/l) \times 流量(月) (m/s)) (5)}$$

各河川について計算したフラックスは、簡易モデルで推定するフラックスと比較し、推定方法の妥当性を評価するために用いる。

2.2.2 最適なフラックス推定手法

フラックスを推定するための手法について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- ・河川流域の質(自然や人為度)を反映する代表的な指標として、水質濃度の適合性が高い。
- ・一方、河川流域の規模についての側面は、流量で代表させることができる。

図 4 に、河川流域の質および規模を表す指標を選定し、フラックスを推定するために望ましいと考える方法を示す。

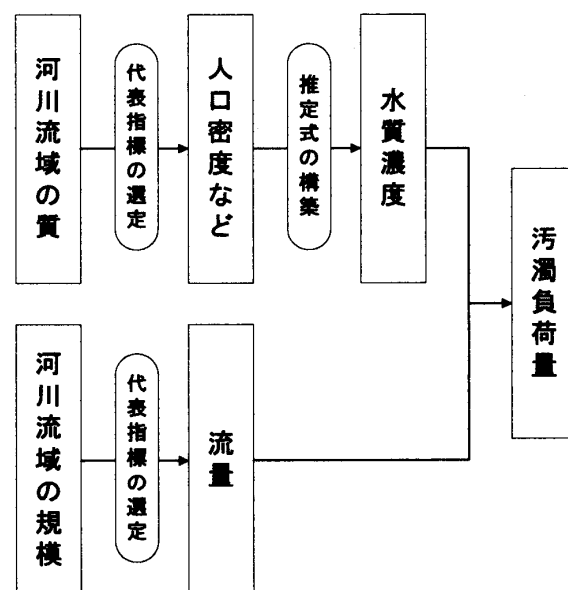


図 4 河川流域の質と規模の反映

2.2.3 水質濃度の推定

表 2 に示した通り、人口密度、建物用地率、森林率の組み合わせにより、各河川について「代表的な水質濃度」を推定することが望ましい。前二者については水質悪化の、後者については水質浄化の要因として位置付けることができる。

河川からの汚濁負荷量推定手法に関する一考察

但し、これは国内主要河川を対象とした結果であり、各説明変数の適合性は地域性などによっても異なる。適用の際には、説明変数の選定や評価から改めて行うべきであると考えられる。

河川ごとの水質濃度を推定するために最適と考える方法について、以下に示す(図5参照)。

- ・水質濃度の代表値として、月別に整備した水質濃度データの中央値²⁾を用いる。
- ・各河川について、水質濃度の代表値と、上記説明変数との関係式を作成する。
- ・関係式は、2変数間の回帰式($y=ax^b$)とする。

2.2.4 フラックスの推定

望ましい指標(人口密度、土地利用)によって

水質濃度を推定したら、その次に、推定した水質濃度と流量を用いて、汚濁負荷量を推定する。

各河川の流量については、水質濃度と同様の理由により、中央値を用いる。

すなわち、次に示す段階を踏むことになる。

①河川流域の諸元より水質濃度を推定

水質濃度(推定) =

$$f(\text{人口密度、建物用地率、森林率、}\dots) \quad (6)$$

②推定した水質濃度に流量(中央値)を乗じて汚濁負荷量を推定

汚濁負荷量(推定) =

$$\text{水質濃度(推定)} \times \text{流量(実測、中央値)} \quad (7)$$

③推定した汚濁負荷量と実測の汚濁負荷量とを比較

3. 結果・考察

3.1 国内河川についての結果

3.1.1 手法の検討に用いた河川

本調査においては、国内主要33河川(図6参照、流域面積は国土面積の42%をカバーする)について解析を行った。

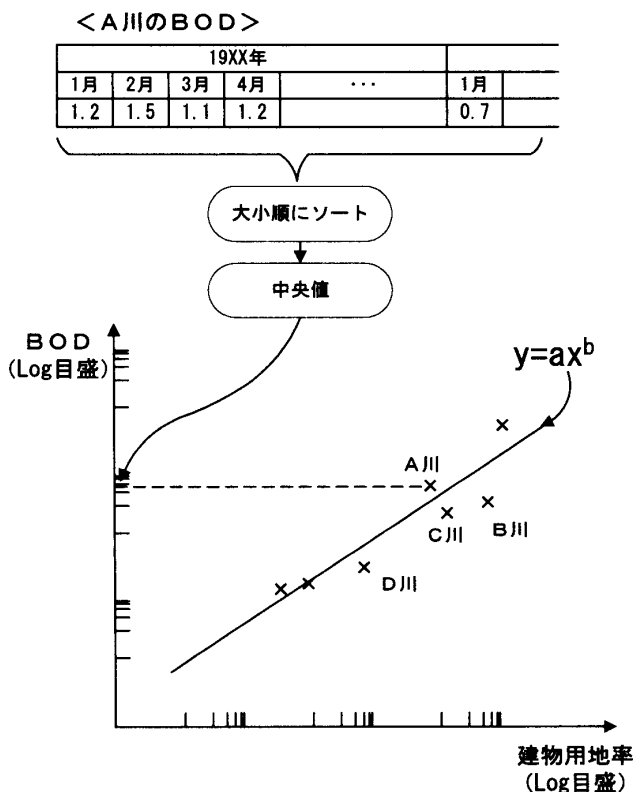


図5 水質濃度推定

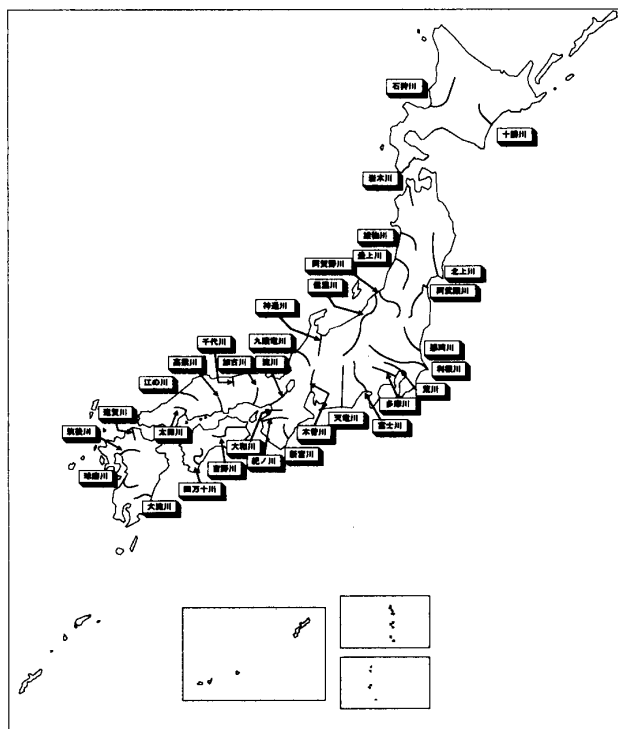


図 6 手法の検討に用いた河川

3.1.2 水質濃度の推定

表3および図7に、国内主要河川について、複数の説明変数から水質濃度を推定した結果を示す。この結果が、表2に反映されている。

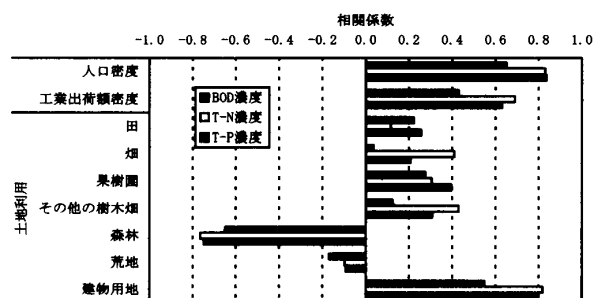


図 7 説明変数と水質濃度との相関係数

すなわち、国内河川で分析した限りにおいては、以下のことを指摘することができる。

- ・水質濃度を左右する「**人為レベルの指標**」としては、**人口密度**や**建物用地率**が適していると考えられる。
- ・水質濃度を左右する「**自然レベルの指標**」としては、**森林率**が適していると考えられる。
- ・BODよりも、T-NやT-Pのほうが、上記指標を強く反映する可能性が高い。

表 3 説明変数と水質濃度との相関係数

説明変数		単位	BOD	T-N	T-P
人口密度		人/km	0.65	0.83	0.84
工業出荷額密度		億円/km ²	0.43	0.69	0.63
土地利用	田	%	0.22	0.12	0.26
	畑	%	0.04	0.41	0.21
	果樹園	%	0.28	0.31	0.40
	その他の樹木畑	%	0.13	0.43	0.31
	森林	%	-0.65	-0.77	-0.75
	荒地	%	-0.17	-0.10	-0.09
	建物用地	%	0.55	0.82	0.79

3.1.3 フラックスの推定

上記(6)式および(7)式を用いて、国内河川についてのフラックスを推定し、実測値((5)式で計算)と比較する。

それにより、本研究で採用し、比較を行った手法のうち、フラックスを推定するために最適な手法が明らかになる。

表4および図8に、国内河川についての結果を示す。

河川からの汚濁負荷量推定手法に関する一考察

表 4 33河川についての推定方法結果比較

推 定 方 法		BOD	T-N	T-P
流量中央値からの推定値	①	0.744	0.596	0.526
流域面積からの推定値	②	0.745	0.718	0.620
月降雨量中央値×流域面積からの推定値	③	0.703	0.618	0.523
人口密度から推定した濃度×流量中央値	④	0.824	0.752	0.831
人口密度から推定した比負荷量×流域面積	⑤	0.729	0.748	0.634
建物用地率から推定した濃度×流量中央値	⑥	0.823	0.791	0.835
森林率から推定した濃度×流量中央値	⑦	0.846	0.800	0.723

注) 数値は、推定値と実績値との相関係数をあらわす。

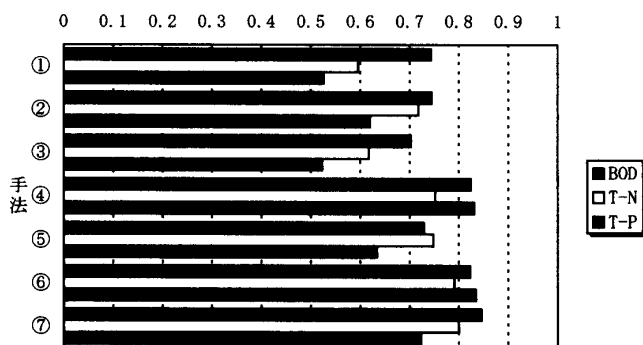


図 8 33河川についての推定方法結果比較

注) ①～⑦は、表 4に対応しており、数値は推定値と実績値との相関係数である。

すなわち、国内河川について見る限り、以下のことを言うことができる。

- ・ ④⑥⑦(これまで述べた手法)が推定手法として適していると考えられる。

- ・ BODについては、①②③といった、河川流域の質(人為活動や自然のレベル)を考慮せず、河川流域の規模(流量、流域面積、降雨量)からのみ推定しても、ある程度の結果が得られる可能性がある。
- ・ T-NやT-Pについては、河川流域の質を考慮せずには、よい推定結果が得られなかった。このことは、T-NやT-Pは人為活動による負荷排出や自然の浄化能力の影響を受けやすいということを示していると考えられる。

図 9 が、本研究の結果である。

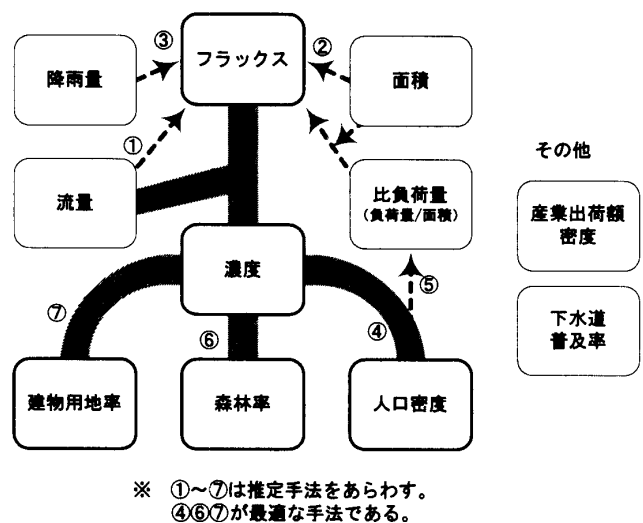


図 9 最適と考えられる手法

3.1.4 河川を經由して流出するフラックス

指標→フラックスの関係を同一とみなすことのできる地域であれば、以下のいずれかの方法によって、その地域全体から河川経由で流出するフラックスを推定することが考えられる(それぞれ誤差が想定される)。

① 流域面積による拡張

$$\begin{aligned}
 & \text{地域全体のフラックス(河川経由)} = \\
 & \text{分析対象河川の全フラックス} \\
 & \times \frac{\text{地域全体の面積}}{\text{分析対象河川の流域面積合計}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

② 流量による拡張

$$\begin{aligned}
 & \text{地域全体のフラックス(河川経由)} = \\
 & \text{分析対象河川からの全フラックス} \\
 & \times \frac{\text{地域全体の河川流量}}{\text{分析対象河川からの全フラックス}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

③ 降雨量による拡張

$$\begin{aligned}
 & \text{地域全体のフラックス(河川経由)} = \\
 & \text{分析対象河川からの全フラックス} \\
 & \times \frac{\text{地域全体の降雨量}}{\text{流域における降雨量合計}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

ここでは、①の方法によって、日本全体から河川経由で海域に流出する汚濁負荷量を計算した。1993～95年次を対象とした試算結果を表5に示す。

$$\begin{aligned}
 & \text{全国土からのフラックス(河川経由)} = \\
 & \frac{\text{33河川からのフラックス合計}}{\text{33河川の流域面積の国土面積カバー率(42\%)}} \quad (11)
 \end{aligned}$$

表 5 日本の河川から流出するフラックス (1993～95、本研究における試算³⁾)

	t/年
BOD	4.3×10^5
T-N	3.8×10^5
T-P	2.2×10^4

3.2 国外河川への手法の適用

本簡易モデルと同様の考えに立って、国外大河川について、河川流域の質をあらわすデータと水質濃度との関係をみた。⁴⁾

これは、気候、地形、居住形態、地質等の地域特性を考慮に入れず、マクロ的に全世界のデータを対象として本簡易モデルの手法を適用した結果を示すものである。

■流域の質：人口密度、森林率、開発地率

■水質濃度：硝酸塩、リン酸塩

開発地率は、人工衛星から見た夜間の光を加工したものとして一般に公表されているもので、本簡易モデルでは建物用地率に相当する。

図10～図15に、上記の「流域の質」と水質濃度との関係を示す。

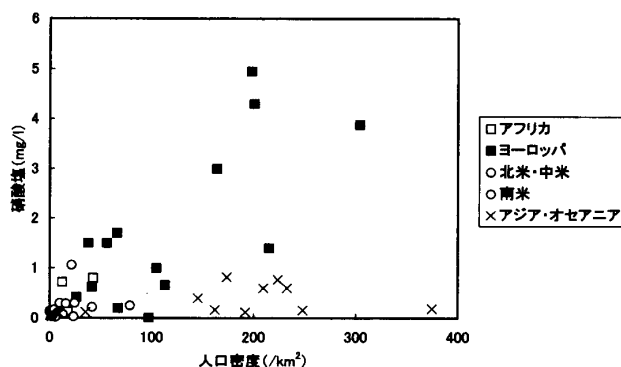


図 10 人口密度～硝酸塩濃度

河川からの汚濁負荷量推定手法に関する一考察

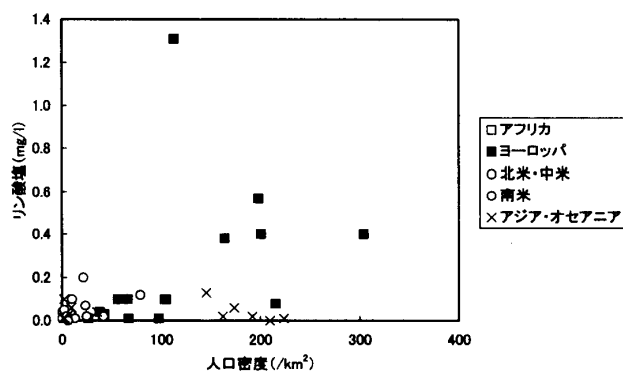


図 11 人口密度～リン酸塩濃度

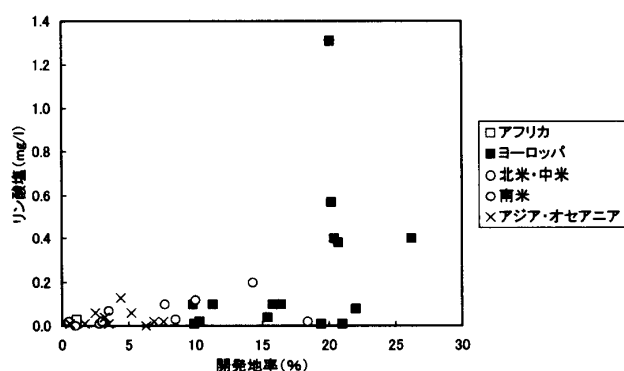


図 15 開発地率～リン酸塩濃度

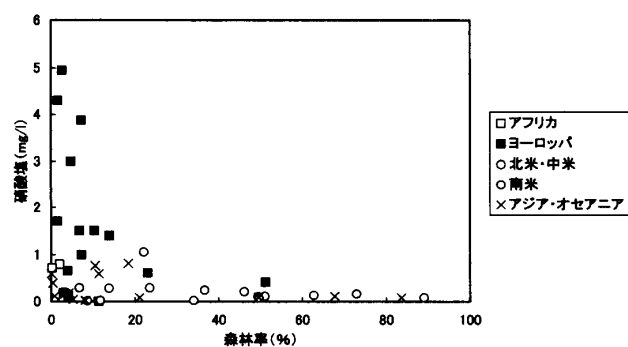


図 12 森林率～硝酸塩濃度

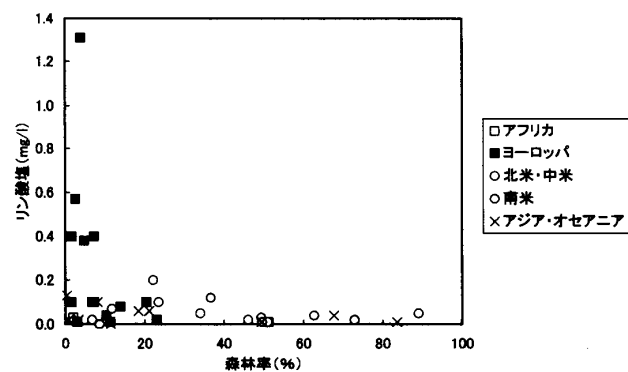


図 13 森林率～リン酸塩濃度

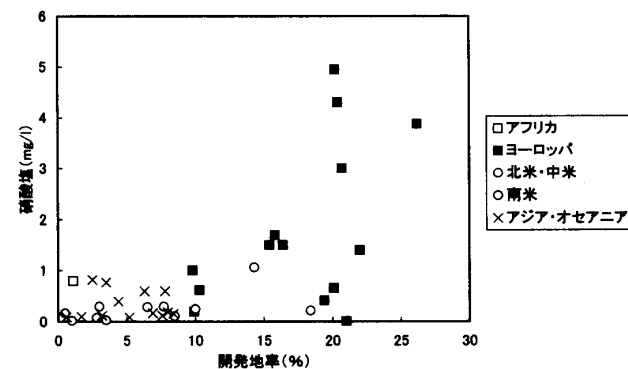


図 14 開発地率～硝酸塩濃度

各グラフより、以下のことを読み取ることができ。

- ・河川流域の質と水質濃度との間には、本簡易モデルと同様の関係がある。すなわち、人口密度および開発地率については正の相関、森林率については負の相関である。
- ・全世界について同時に見るよりも、各地域について関係を見たほうがよいことが多い。すなわち、ある地域について本簡易モデルを適用する場合には、地域の性質がかけ離れないよう、その範囲を限定する必要がある。たとえば、河川勾配の急な日本や東南アジア諸島地域などと、緩やかな欧州地域などを並列に評価することは避けるべきだろう。

謝辞

本調査研究の遂行にあたり、ご協力いただいた山辺功二氏、田宮浩氏(富士総研)、上甲幸子氏(スウェーデン宇宙物理研究所)に、また、ご助言いただいた鎌谷明善氏(東京水産大)に対し、深く感謝申し上げます。

参考文献

以下に、本研究に用いた主な文献を示す。

- 浮田正夫・中西弘：河川の汚濁負荷流達率に関する研究、土木学会論文集、第357号、1985
- 海老瀬潜一：河川からの汚濁負荷流入に対する湖沼の水質応答—河川で起こっている傾向は湖沼でも起こっている傾向である—、公害と対策、Vol. 26 No. 6、1990
- 河原長美・福寿真也・北川知与司：年間総流出負荷量の推定法に関する研究、水道協会雑誌、第593号、1985
- 鎌谷明善・前田勝：東京湾における磷の分布と収支、地球化学、23、85-95、1989
- 國松孝男・村岡浩爾編：河川汚濁のモデル解析、技法堂出版、1989
- 須藤英雄編：東京水産大学第18回公開講座・海からみた地球環境、成山堂書店、1994
- 中島興基・齊藤聡・田宮浩・山辺功二：河川からの汚濁負荷量(フラックス)推定手法に関する一考察、第32回日本水環境学会年会講演集、1998
- 中島興基・齊藤聡：河川からの汚濁負荷量(フラックス)推定手法に関する一考察(2)、第33回日本水環境学会年会講演集、1999
- 中島興基・齊藤聡：国内の河川経由汚濁負荷全量(フラックス)の推定方法とその応用について、第34回日本水環境学会年会講演集、2000
- 原沢英夫・市川新(所収／玉井信行：多摩川中流部における低水時の流出の構造並びに水質特性に関する基礎的研究—地下水との相関ならびに水質の変動特性について—、1979)
- 福島武彦・村岡浩爾・天野耕二：全国河川を対象とした水質変動特性の解析、衛生工学研究論文集、第24巻、1988
- 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・負荷量に関する研究(I)—汚濁流出特性への水文学的アプローチ、土木研究所報告、第151号、1978
- 和田安彦・三浦浩之：中小河川における汚濁流出率の諸特性、土木学会論文集、第363号、1985
- Rotmans, J. and Bert de Vries : Perspectives on Global Change, Cambridge University Press、1997
- Wollast, R., F. T. Mackenzie and L. Chou(eds) : Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change, Springer-Verlag, Heiderberg, 1993

河川からの汚濁負荷量推定手法に関する一考察

使用データ

- 環境情報普及センター：公共用水域データファイル
- 気象庁：アメダス月別値
- 建設省河川局：水質年表、関東建設弘済会
- 建設省河川局：日本河川水質年鑑、日本河川協会
- 建設省河川局：流量年表、日本河川協会
- 建設省国土地理院：1/10細分区画土地利用データ、1987～1990
- 建設省国土地理院：流域界・非集水界位置、1977
- UNEP：Water Quality of World River Basins, UNEP Environment Library No. 14, 1995
- United Nations Environmental Programme GEMS/WATER: Annotated Digital Atlas of Global Water Quality, <http://www.cciw.ca/gems/atlas-gwq/intro.html>
- World Resource Institute: World Resources 1998-99, <http://www.wri.org/facts/data-tables.html>, 1999

注

- 1 例えば、1/6は、年間2回(6ヶ月に1回)の測定状況を示す。
 - 2 水質濃度や流量は、正規分布形からかけ離れた分布である場合が多く、その際には、各々の代表値として、中央値を採用することが望ましい。なお、ばらつきを代表する値としては、四分位範囲(75%値－25%値)が適当である。
 - 3 この結果を、他文献と平均濃度によって比較すると、BODおよびT-Nについてはほぼ整合した。しかし、T-Pについては、本結果が世界平均よりも1桁小さかった。原因としては、以下の3つが考えられる。
 - ① 懸濁態T-Pが測定されていない
 - ② 日本のT-P濃度が低い
 - ③ データの信頼性が低い
- 詳細は、参考文献を参照のこと。
- 4 GEMS/Water、WRIの公開データを使用した。(URLアドレスは使用データを参照のこと。)

* 中島興基 現在本研究所所員
元国立環境研究所地球環境研究センター

** 齊藤 聡 (株)富士総合研究所

ABSTRACT

Approach to Methods for Estimating Pollutant Load (Flux) of the River

Koki NAKAJIMA and Akira SAITO*

One of the GEMS/Water (the inland water monitoring project of the Global Environment Monitoring System, which has been jointly promoted by UNEP and WHO since 1994) programs concerns quantification of pollutant loads (flux) discharged from land into the marine environment. However, at the moment, only discharges and concentrations are measured in the limited number of rivers in Japan that are participating in this program. Thus, since fiscal 1996, CGER/NIES has been developing a flux analysis method targeted on domestic rivers in order to propose a method that more accurately estimates pollutant loads. This study is conducted as Phase 4 of a 4-year research program.

The following points can be stated from the analysis.

- Water quality concentration is effected by river basin quality rather than scale.
- In other words, pollutant load degree differs according to the relative levels of nature and human activities when a number of rivers are compared.
- Such differences must be defined as being representative of the water quality concentration.
- Discharge should be representative of the scale of the river basin.

Ideally, a 'representative water quality concentration' is estimated per river by combining the population density, ratio of developed land and ratio of wooded land. The first two factors can be defined as causes of water deterioration while the last results in water purification.

Next, the pollutant load will be estimated using the estimated water quality concentrations and discharges. The estimated pollutant load is compared with the actual pollutant load.

However, this is the result of analysis targeted on 33 major Japanese rivers, so the conformity of each explanatory variable may differ according to the regional characteristics. Thus, what is described here is a method intended for estimating major Japanese rivers and explanatory variables must be reselected and reevaluated for application in the simple model. When applying the simple model to a region, the area must be limited so that regional characteristics are fairly similar. For example, simultaneous evaluation between the Japanese or other South East Asian islands whose rivers are very steep against the gentle ones in Europe should be avoided.

*Fuji Research Institute Corporation