

河川水質・負荷量の変動特性とその推定

A Study on The Characteristics of Water Quality and Pollutant Load in
The River and It's Estimation

建設省 土木研究所 正 吉川勝秀

1. はじめに

琵琶湖や瀬戸内海といった停滞性水域の環境保全およびその改善のために、我国においても流入負荷量の削減計画が主としてポイント・ソース負荷量に対して策定されつつある。一方アメリカにおいては、長大河川の水質がポイント・ソース負荷量の制御のみでは不可能であり、ノンポイント・ソース負荷量の制御が重要であることが議論されている。

本研究では、河川を流下する負荷量のうちの相当量が、降雨・流出といった水文量に応答してノンポイント・ソースから流出していることを実証的に示すとともに、総量規制においては雨天時の負荷量の制御が重要であることを指摘した。次に汚濁負荷流出量を水文学的要因のもとで推定する方法とその精度、および限られたサンプルから総負荷量を推定する方法と精度について検討した。

研究を進めるにあたっては、水文学的な観点から河川水質・負荷量をとらえているという立場をとっており、それを行う第一歩として相当マクロ的に現象を把握している。

2. 従来の研究

本研究に関連する従来の研究としては、第一に wash load に関連して Straub(1935), Campbell・Bauder(1949), 吉川(1952, 59), Guy(1964), 須賀(1970)らの実証的な研究がある。これらの研究では、実測に基づいて Q_s (負荷量) $\propto Q^n$ ($n: \text{const}$) の関係を求め、若干の理論的な説明を行っている。第2に、同様にしてさらに多様な水質項目について、水文量 (Q , R) と水質 C および負荷量 Q_s の関係を求めたものとしては、Gunnerson(1967), 羽田(1977), 市川(1975), 山口・吉川(1978)の研究がある。¹⁾

一方このような Q_s あるいは C と水文量 (Q あるいは R) との関係をシミュレーションするモデルについては、山口・吉川(1979)が従来のモデルを「流送能力」型モデルと「流送能力・供給関数」型モデルに分けて統一的に取り扱っている²⁾。さらに、河川の水質・負荷量の推定に関しては、新田(1961), 建設省河川局(1978)の研究がある。¹⁾

3. 水文学的なアプローチによりみた河川水質・負荷量の変動特性

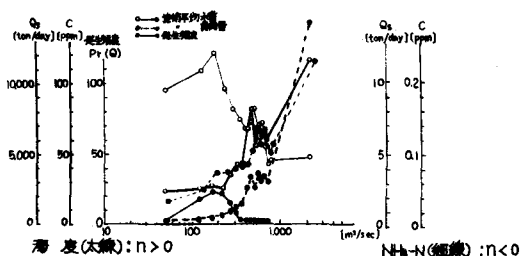
ここでは、河川水質・負荷量と水文量の関係の特性を整理し、後述の河川総負荷量の推定の基礎資料を提示しておくことにする。

(1) Q_s , $C \sim Q$ マクロ的な関係

河川水質 C と流量 Q の関係は、マクロ的にみると $C \propto Q^n$ で近似され、 $n > 0$ の場合の水質項目は汚濁型、 $n \neq 0$ の場合には中間型、 $n < 0$ の場合には希釈型の水質項目と呼ぶことができる。図-1に淀川を例として水質 C ・負荷量 Q_s の関係を示す。

(2) 晴天時と雨天時の負荷量の比率

河川においては、定常的に流出している負荷量と水文量に応答して流出している負荷量がある。そのような負荷量の相対的な比率を図-2に示すような2つの概念に従って求めてみると図-3のようになり、水質項目によって異なるが、降雨・流出に伴って流出している負荷量が相当多いことが分る。ただし、分離の基準として(1)の分離方法では低水流量を、また(2)の分離方法では流量規模上位10%および25%としている。

図-1 Q_s , $C \sim Q$ のマクロ的な関係の例示 (淀川, 濁度・ $\text{NH}_4\text{-N}$)

(3)出水時の特性（ハイドログラフとポルトグラフの関係）

降雨流出（ハイドログラフ）と水質・負荷量（ポルトグラフ）の相互関係をまとめると次のようになる。

(a)波形のちがい（相関解析による分析）

出水時のハイドログラフに比較して、ポルトグラフは一般に先鋭である。これは自己相関係数および相互相関係数を求めることにより明確にすることができる。淀川を例として自己相関係数を求めたものを図-4、また水文量と相互相関係数を図-5に示す。図-4、5に示す流量Qに関するものと各水質項目に関するものを比較することにより、ポルトグラフがハイドログラフに比較して先鋭であることが分る。また、図-5からは、さらに水質項目が先行降雨および当日降雨に対して汚濁型であるか希釈型であるかも分る。

(b)ループ特性（単一出水時の特性）

上記(a)より明らかなように、ハイドログラフとポルトグラフのずれのために、単一出水時の流量と水質・負荷量の関係はループを描く。淀川の汚濁に対するループ特性を図-6に例示するが、この特性は他の水質項目についても同様にみうけられる。

(c)連続出水時の特性

ある規模の流量に対応して流出する負荷量や水質は、先行する降雨（あるいは先行晴天日数）によってその程度が異なる。その1例として、淀川において前5日間に250 m³/secを越える孤立したピーク出水があった場合と無かった場合の水質・負荷量のちがいを、図-7に淀川の濁度を例として示す。このような特性は他の水質項目についても同様にみられ、先行する出水がある場合には、次の出水時の負荷量はそれが無い場合に比較して減少することが分る。

(d)連続出水時の特性

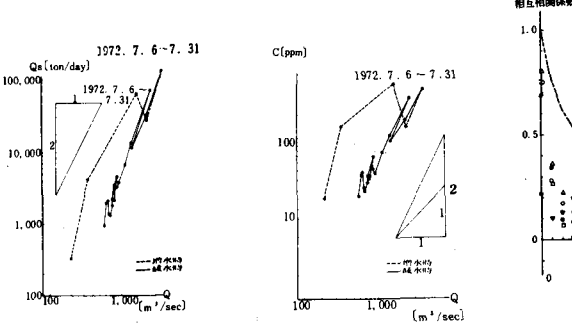


図-6 単一出水時の特性

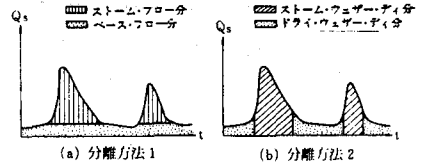
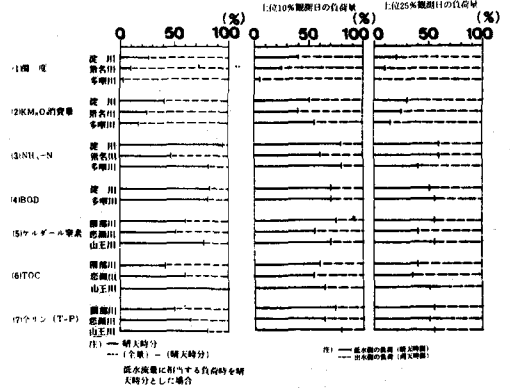
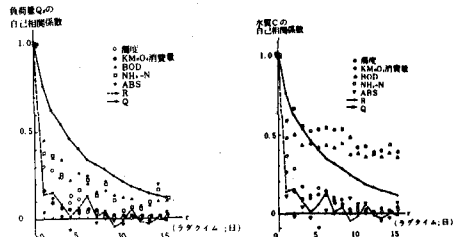


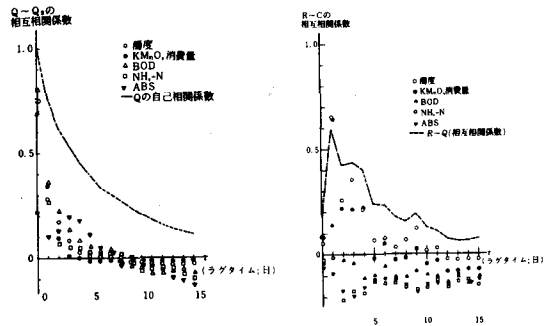
図-2 分離方法の概念図



(a)分離方法1の結果 (b)分離方法2の結果
図-3 汚濁負荷量の分離結果



(a)負荷量 (b)水質
図-4 負荷量・水質の自己相関係数



(a)負荷量 (b)水質
図-5 降雨と負荷量・水質の相互相関係数

(d)汚濁負荷量流出特性の模式化

出水時における汚濁負荷量の流出特性は、以上の(a)～(c)の特性分析より、図-8に示すように模式化して示すことができる。すなわち、単一出水時には増水時と減水時で Q_s 、CとQの関係がずれること、および先行出水（あるいは先行晴天日数）により同じ規模の流量に対する流出負荷量および水質が異なることが流出の特性である。ただし、その程度は水質項目によって異なり、水質項目によってはこの特性をオーダ的に無視しうるものもある。

(3)長期データによる特性分析

多摩川における17年間の毎日観測データをもとにして、経年的な負荷量流出特性を調べると、図-9のようになる。これより、水質項目によっては、濁度・ KM_n ・ Q_4 消費量・ECのように、その年の流出量により負荷量が大きく変化するもの（水文量によって総流出負荷量が支配されるもの）と、 NH_4-N のように経年的に変化しているが流出量によらずその量がほぼ定まっているもの（負荷量の供給に限りがあるもの）が存在することが分る。

4. 河川総負荷量の推定方法と精度

現状において、河川の水質・負荷量を毎日（あるいは毎時間）測定することは、費用その他の面で不可能に近い。そこで、ここでは限られたサンプルにより年間の総負荷量を推定することを考える。

その際に、3.における負荷量の流出特性解析に基づいて、2つの方法を考え、それによる推定精度を明らかにする。第1の方法は、河川の年間総負荷量はその相当量が降雨流出に定着して流出していることから、水文量を説明変数と

する水文学的なシミュレーション・モデルを用いる。第2の方法としては、定期的なサンプリング・データを用いた推定を考える。第2の方法に関しては、水質項目と望ましいサンプリングの方法の関係およびどのような推定式を用いたらよいかについても考察する。

(1)水文学的なシミュレーション・モデルによる方法とその精度

水文学的なシミュレーション・モデルとしては、「流送能力」型と「流送能力・供給関数」型モデルがあり^{1),2)} それぞれのように示される。

・「流送能力」型モデル

$$Q_s = \text{func.}(Q) = A_0 + (-1)^M a (|Q - Q_0|)^b, \\ [Q > Q_0 \rightarrow M=2, Q < Q_0 \rightarrow M=1, a > 0] \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 A_0 ：ベース・フローに対応する負荷量で定数、

Q_0 ：ベース・フロー、 $a \cdot b$ ：定数。

・「流送能力・供給関数」型モデル

$$Q_s = \text{func.}(Q, S) = a Q^b S^c \quad \dots\dots\dots(2)$$

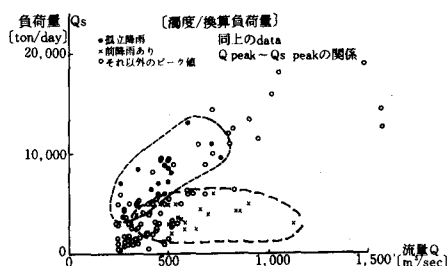


図-7 $Q_{peak} \sim Q_{speak}$ (or C_{peak}) の関係

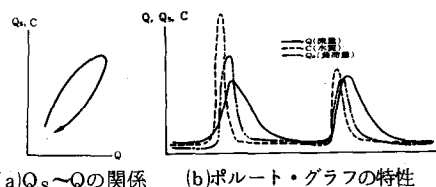


図-8 汚濁負荷量流出特性の模式化
(汚濁型水質項目について)

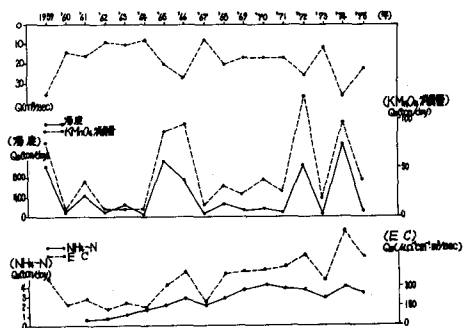


図-9 長期データによる負荷量流出時特性分析

$$\frac{dS}{dt} = S_{in} - Q_s \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$S_{in} = f(t) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、S : 流出する汚濁負荷量のポテンシャル、 S_{in} : 汚濁負荷量の供給関数。

以上の2つのモデルは、パラメータの同定の仕方によって推定精度が異なる。^{1) 2)}ここでは、このような方法によるおおよその推定精度を示すことを目的とし、2ヶ月間の毎日データを用いて最小2乗法により単純にモデルの同定を行った場合の精度を図-10に示す。これにより、次のことが分る。ただし、この時の S_{in} としては年間平均の Q_s を与えている。

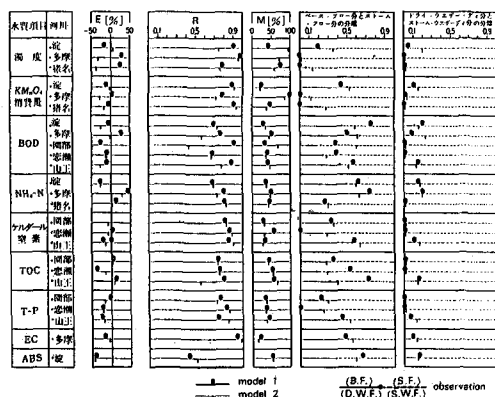


図-10 シミュレーション結果

①本研究で用いた水文学的なモデルによるシミュレーションでの年間総負荷量の誤差Eは、大規模河川の濁度、 KM_nO_4 消費量、BOD、 NH_4-N 、ECなどは約0～30%である。

②同様に実測値と推定値の相関係数Rは0.70～0.95程度である。また、 Q_s について加重平均した平均誤差率は約40%程度である。

③ポルトグラフのシミュレーション精度は、EC、濁度あるいは KM_nO_4 消費量、BOD、 NH_4-N の順に低くなる。これは人為的な排出源からの負荷量と水文要因の対応があまりよくないことと一致している。

④EC、 KM_nO_4 消費量、濁度はパラメータの数が少なく、同定の容易な「流送能力」型のモデルで十分にシミュレーションすることができる。BOD、 NH_4-N のように人為的な排出源に主として依存すると考えられる水質項目については、「流送能力・供給関数」型の方が適合性がよい傾向にある。

⑤ABSに対しては水文学的なモデルの適合性が悪い(水文学的要因によるシミュレーションが難しい)。

⑥また、モデルの同定に関しては、次のようなことがいえる。本モデルのような水文学的なモデルの定数は、高流量時のデータを多く含む同定区間において同定した方が、年間を通じてのシミュレーションでは精度が高い傾向にある。

水文学的なモデルにより、ベース・フロー分とストーム・フロー分(分離方法1)の比率は、0～10%程度の誤差で推定することができる。

⑧ドライ・ウェザー・デイ分とストーム・ウェザー・デイ分(分離方法2)の比率は、0～10%程度の誤差で推定することができる。

なお、パラメータの同定方法と推定精度の関係についての詳細な分析については参考文献(1)、(2)を参照されたい。

(2) 定期的サンプリングによる方法と推定精度

3.における基礎的な分析により、河川の汚濁負荷量は水文量の程度により大きく変化していることが明らかとなっている。したがって、定期サンプリングによる負荷量の推定においては、次の3つの主要な要因を考えなければならない。すなわち、①サンプリングの回数(ここでは月当りの回数を考える)、②サンプルデータから年間総負荷量を推定する式、③流量規模に着目したサンプリングの方法(低流量時に密なサンプリング、定期的なランダム・サンプリング、高流量時に密なサンプリング)である。山口・吉川(1979)は、これら3つの要因と推定精度の関係について理論的な検討を行い、水質項目ごとの負荷量 Q_s と流量 Q の関係により($Q_s \propto Q^n$ としたときの n ($n \geq 0$))により、一方に片よった誤差(定誤差)が生じることを示している。

ここでは、次のようなサンプリング方法と推定式を用いた時に生じる誤差のおおよその程度を明らかにすることにする。

a) サンプルング方法（流量規模に着目）

- (i) 定期的サンプルング（ランダム・サンプルング），
(ii) 低流量時に密なサンプルング，(iii) 高流量時に密なサンプルング

b) 推定式

用いた推定式を表-1に示す。

①，②，④式はサンプルングした時の水質と流量のみから年間総負荷量を推定しようとするものであり，最も簡便な方法である。③，⑤，⑥，⑦式は流量が常に観測されている場合に，限られてた水質サンプル・データから総負荷量を推定する方法であり，流量データが与件であることが前提である。なお，これらのうちで③および⑤式は簡便な方法であり，⑥，⑦式は $CorQ_s = aQ^b$ のレーティング・カーブが正しく与えられていれば常に真値に一致するものである。

c) 計算結果と各図の見方

図-11は淀川を例として①～⑦式により $Q_s(\text{total})$ を推定したものであり，ここでは推定式の精度およびサンプルング方法および必要な回数をみようとしたものである。図-11は次のようにみる。縦軸が Γ （＝推定値／真値），横軸がサンプルング回数 No であり，各式について，各 No に対する太い実線・破線・細い実線の3本で一組になっており，各河川の水質項目数に等しい数だけ描かれている。3本一組の線は，右上の注)に示すように，左から汚濁型の水質項目より始めて希釈型の水質項目の順（淀川の場合には濁度・ KM_nO_4 消費量・BOD・ NH_4-N の順）に Γ を示している（たての幅は前後に3日間サンプルング日をずらしたときの感度分析による）。また3本で一組となっているそれぞれの線は，太い実線が等間隔サンプルングに，破線が低流量時サンプルングに，細い実線が高流量時サンプルングにそれぞれ対応している。

d) 考 察

ここで行った数値解析は，一つの試行であって完全な一般性をもっているのではないが，試行の数（6河川・9水質項目）および水質項目と河川についての比較分析の結果として，定性的な考察を可能にする。このような試行により，限られたサンプルによる年間総負荷量を推定することに関して，次のようなことが明らかとなる。

・サンプルング方法について：①図-11の淀川の例でも分るように，汚濁型の水質項目（ $n > 0$ ：濁度， KM_nO_4 消費量）に対しては，高流量時（あるいは等間隔）サンプルングが良い結果を与えている。また希釈型（ $n < 0$ ）ではあるが n がゼロに近い NH_4-N や BOD（水質が平均的にみると流量規模とほとんど無関係）については，サンプルング方法にかかわらず真値に近い値を与えている。このような関係は他の河川においても認められる。

②したがって，年間総負荷量を限られたサンプルから推定するためには，水質と流量の関係に着目した水質の観測が重要であることが分る。すなわち，汚濁型（ $n > 0$ ）に対しては流量規模が相対的に大である状況にウェイトを置いたサンプルングが要請され，また希釈型の場合にはその逆である。しかし， $n \neq 0$ で中間型に近い水質項目については，流量規模にとらわれないサンプルングでも良いことになる。

③従来から行われてきた低流量時に片寄った水質観測のもとでは，汚濁型の水質項目に対する総負荷量の推定において真値より低い値を示す可能性がある。

・推定式について：①図-11が示すように，原則として水質観測時の水質と流量のみのデータから総負荷量を推定する①，②，④式においては，①，②式では推定誤差およびちらばりは覚悟しなければならないことが分る。これに対して④式は相対的に良い結果を与えている。しかし，①，②，④式のような方法では，水質項目のタイプ（ $n \geq 0$ ）ごとに理論的な考察で示されるように，¹⁾一定の傾向をもった定誤差が生じる。

表-1 推定式

① $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^M \bar{Q}_i \times \bar{Q}_i \times B_i$	$\bar{Q}_i$: i 月のサンプルの平均水質 $\bar{Q}_i$: " の平均流量 B_i : i 月の日数
② $Q_s(\text{total}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [(Q_{i1} \times Q_{i1}) + \dots + (Q_{in} \times Q_{in})] / M$ (月の日数)	
③ $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^M \bar{Q}_i \times TQ_i$	TQ_i : i 月の総流量
④ $Q_s(\text{total}) = \bar{Q} \times \bar{Q} \times 365$	$\bar{Q}$: 全サンプルの平均水質 $\bar{Q}$: " の平均流量
⑤ $Q_s(\text{total}) = \bar{C} \times TQ$	TQ : 年間総流量
⑥ rating curve より (その1) ・ $Q_s = aQ^b$ で，全サンプルより定数 a ， b を測定 ・ $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^M aQ_i^b$	
⑦ rating curve より (その2) ・ $C = aQ^b$ で全サンプルより定数 a' ， b' を測定 ・ $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^M a'Q_i^{b'} \times Q_i$	

②流量データが十分と
られている河川において
用いられる③、⑤、⑥、
⑦式において、計算方法
が単純な③、⑤式は、前
述の4式とはほぼ同じ程度
の推定値を与えている。
レーティング・カーブを
用いる⑥、⑦式は、理論
的にはサンプリング方法
にかかわらず最も正しい
推定を行う方法であるが¹⁾、
現実問題として与えられ
たサンプルから係数を機
械的に同定しようとすれ
ば大きな誤差が生じる傾
向にある。

③以上より、水質・流
量データがサンプリング
時のみのものしか無い場
合には、④式が無難な方

法と言えよう。また、流量データが十分そろっている場合には、③式あるいは⑤式が相対的に安定した値を
与えることになる。しかし、③、④、⑤式においては、サンプリング方式に伴う定誤差が生じることは否定
できない。

④⑥、⑦式のレーティング・カーブによる方法は、理論的には有利と判断されるが、係数を機械的に同定
すると誤差が生じる。しかしこの方法は、係数さえ正しく与えられれば、定誤差が少なく良い結果を与える
ので、逆に言えばそれを可能にするための観測体制を整えることが望まれる。

・サンプリング回数について：

①少ないサンプルから比較的良好な結果を与える推定式は③、④、⑤式である。

②ある精度のもとでの必要なサンプリング回数は、水質項目・用いる推定式・サンプリング方法により異なる。

③全般的な傾向として、月1回程度のサンプリング回数とさらに回数を増した場合の推定精度はあまりち
がっておらず、したがって実用的には月1回が妥協的な回数ではないと思われる。精度をさらに向上させ
るためには相当サンプリング回数を増すことを覚悟しなければならない。

5. 結 語

本研究では、河川水質・負荷量と水文量のマクロ的な関係と年間総負荷量の推定について、あえて大づかみ
の議論を行った。これにより河川の水質・負荷量については水文学的なアプローチが重要であることが明ら
かになったと思われる。今後より詳細でリファインされた研究が行われる必要がある。

〔参考文献〕①山口・吉川：河川の水質・負荷量に関する研究(1)，(2)，土木研究所報告，1979

②山口・吉川・興石：河川の水質・負荷量に関する水文学的研究，土木学会論文報告集，1980年1月(予定)

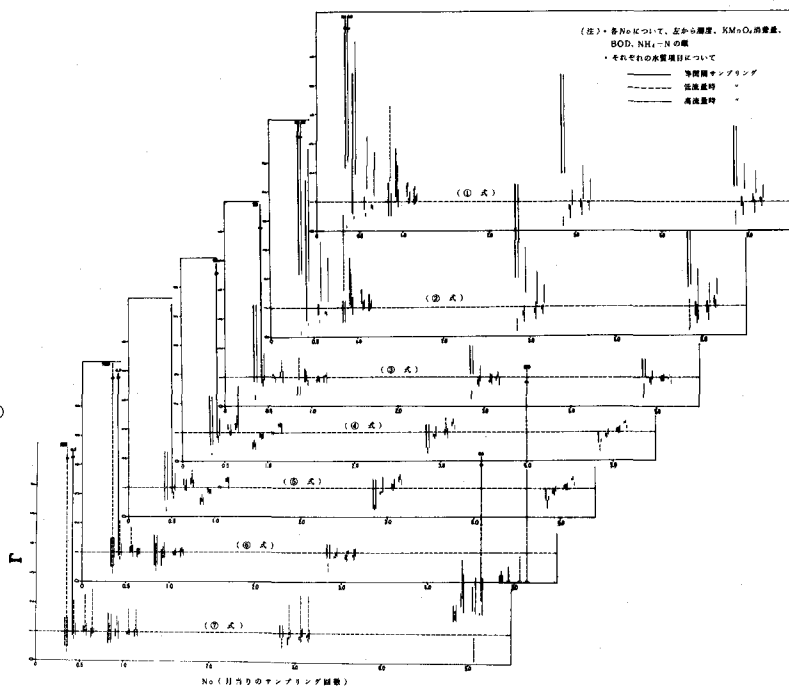


図-11 限られたサンプルによる年間総負荷量の推定結果