公表調査データの統計解析による市街地ノンポイント汚濁負荷流出量の予測とその信頼性評価

尾崎 則 篤^{1),*} 和田 桂 子²⁾ 村上 道 夫³⁾
中 島 典 之⁴⁾ 古 米 弘 明⁴⁾

Prediction and its Reliability Evaluation of Urban Non-point Pollution Loading by Statistical Analysis of the Data of Published Researches

Noriatsu OZAKI^{1),*}, Keiko WADA²⁾, Michio MURAKAMI³⁾,
Fumiyuki NAKAJIMA⁴⁾ and Hiroaki FURUMAI⁴⁾

¹⁾ Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima 739-8527, Japan

²⁾ Institute of Lake Biwa-Yodo River Water Purification Research, Lake Biwa-Yodo River Water Quality Preservation Organization, Otemae 1-2-15, Chuo-ku, Osaka 540-0008, Japan

³⁾ Fukushima Medical University, 1 Hikarigaoka, Fukushima 960-1295, Japan

⁴⁾ Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Abstract

Papers and reports on investigations of the urban drainage in Japan were collected (1968–2011) and a database of urban runoff loading for each measured precipitation event was prepared. The targeted pollutants were BOD, COD, SS, TN, and TP, and their event mean concentrations (EMC) were included in each data set along with their precipitation event conditions. The distribution of loading and the geographic conditions of the basins were clarified, and the dependence of the EMC values on the precipitation and geographic conditions was modeled using the regression equation of a power law. Using this relation, the predicted yearly loading and coefficients of variation were derived for four representative precipitation conditions in Japan. The required sampling frequency to attain a certain accuracy of the annual loading was estimated by a simulation using the above model. From the results, at least half of the precipitation events must be sampled for the 95% confidence interval of annual loading to be within the range of half to double the true value.

Keywords: EMC (event mean concentration); Organic matter; SS; Nutrients; Specific load

1. はじめに

わが国では、公害問題の深刻化から、1970年に「水質汚濁に係る環境基準」(以下環境基準)が制定された。この環境基準を遵守するために、全国の公共用水域では、排水規制の強化、生活排水対策の推進、下水道施設の整備などの特定汚染源(ポイントソース)に対する取り組みが実施され、その結果、水質は改善し、河川の環境基準の達成率は向上した。その一方、湖沼や内湾、内海などの閉鎖性水域は、集水域の人為的要因による栄養塩の排出の増加に伴う富栄養化が進み、異臭味や水道障害など水利用に支障をきたしている。このような閉鎖性水域における環境基準の未達成には、水質汚濁防止法の規制等による流入汚濁負荷の削減では対応できない多岐多様

な発生源の流入も関与している。とくに非特定汚染源(ノンポイントソース)は、主に雨天時に広範囲にわたり流出する面的な負荷源で、今なお十分な対策が取られていないと言いがたい。そのため、集水域の特定汚染源に対する施策の着実な実施とは対照的なノンポイントソース対策の遅れによって、流入汚濁負荷源別の全負荷量に占めるノンポイントソースの割合が増加していることが問題視されている。なかでも、市街地(道路・宅地)は、人為的な汚濁負荷発生の寄与が大きく、雨天時の流出水には有機物や栄養塩類(窒素、リン)の他に、重金属類や微量有害有機化合物、病原微生物などの汚染も報告されている¹⁻³⁾。一方で、水生生物の生息・生育にとって欠かせない栄養塩類は、負荷量削減によって、一部の基準達成水域では生態系や漁業生産への影響が顕在化してき

1) 広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1

2) 公益財団法人琵琶湖・淀川水質保全機構 琵琶湖・淀川水質浄化研究所 〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15 大手前センタービル4F

3) 福島県立医科大学 〒960-1295 福島県福島市光が丘1

4) 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

* 連絡先: ojaki@hiroshima-u.ac.jp

たことから^{4, 5)}、現在、「豊かな海」、「水産資源の持続的な利用の確保」を目指す新たな取り組みも始められている^{6, 7)}。したがって、水利用用途やステークホルダーの要望に応じて、赤潮や貧酸素水塊、病原性リスクなど従来から継続する水質汚濁問題への対策の推進や栄養塩類の循環バランスによる生態系への配慮が必要となってきた。このような背景から、水環境を管理する上でノンポイント汚濁負荷量の予測は必要不可欠であり、適切な影響因子を把握することはますます重要になってくると考えられる。

水質保全のための汚濁負荷量の現況把握と対策効果の予測では、現地モニタリングと、汚染の発生や流出に関する機構解明とを組み合わせる行うが、ノンポイントソースは地域特性に大きく影響され、また、流出負荷量の時空間的な変動が大きいことから、現況把握のための現地モニタリングが重要と考えられている。しかし、調査の費用や時間等の制約から十分なデータを得られないことが多い。その場合、現地データに強く依存せず、原単位法や数値シミュレーションに基づき、現況把握、対策効果の予測を行う方法もある。最近では、雨水流出解析ツールの進歩と GIS の整備により、モデル式による水質の時空間的な変動を詳細に再現することも可能になってきた⁸⁾。このような現地モニタリングデータに強く依存しない算定において重要になるのは用いたパラメータの信頼度であり、とくに、発生源における原単位は、発生する総負荷量を算定し、大枠の発生量を把握する基礎データとして重要視されているため、流域別下水道整備総合計画、湖沼水質保全計画、指針やガイドライン等で、設定値の考え方や計算手法に基づき、各土地利用形態や水域別に提示されている^{9, 10)}。また、原単位について調査事例を総括している報告も見られる^{11~14)}。これらのケースでは、自然系のうち湖面降雨のように年次毎の測定が可能な調査地点のデータを活用し、基準年次に更新されるものもあるが、宅地・道路をはじめ多様な土地利用形態が混在する市街地は、適用する地域の調査事例が少ないため、他の結果を基に設定されている場合がある。また、1980~1990 年代の調査結果が多く、現在も適用可能か疑問である。さらに、その後も各地域で調査が実施されているものの、標準的な推定手法がないため、物質収支の観点から数値の妥当性の検証までは至っていないのが現状である。

これらを鑑み、日本水環境学会のノンポイント汚染研究委員会は、環境研究総合推進費による研究課題として、日本での原単位に係わる既往の文献について、研究論文および各自治体の調査報告書を含めた幅広い情報を収集整理し、データベース (DB) の整備を行ってきた。また、ノンポイント汚染源の位置づけや、原単位に関する考え方について、日本と海外での実情を踏まえた整理や、市街地、農地、林地および森林で実際に提示されている原単位について議論も行われた^{15, 16)}。

本報では、この DB 整備の成果に基づき、とくに市街地を対象とし、基本項目である BOD, COD, SS, TN, TP について、関係する文献や資料の再整理を行い、まずその集計した数値を報告した。本研究ではとくに重要な指標として降雨ごとの EMC (流量加重平均濃度, event mean concentration) を抽出または算定した。続いてそ

の EMC に影響を及ぼす諸因子を見だし、それらとの関係を定式化することを試みた。更にその式に基づき特定の降雨状況が年間の汚濁負荷流出量に及ぼす影響を考察した。

また、1 年間を通じてすべての降雨イベント (以下、イベントと記す) でデータを取得することは困難であり、一般には限られた回数の調査から得られた合計負荷量および合計流出量と年間総流出量の比 (あるいは合計降水量と年間総降水量の比) から年間負荷量を推定する。しかし、調査回数と年間負荷量の推定誤差の関係には不明な点が多いことから、年間負荷量を精度よく推定するための調査回数について解析を行った。

2. 方法

2.1 データの入手と整理

以下の方針に従い国内外の論文、報告書等の文献を収集した：

- ・論文と、官公庁、国立や公立の研究機関等の報告書を可能な限り網羅的に収集。
- ・日本を対象とした調査研究を収集。

結果として収集された論文 / 報告書件数は 163 本となった (1968~2011, 報告書 : 37 件, 和文論文 : 71 本, 英文論文 : 55 本)。なおこれらは 2015 年 1 月現在の情報であり DB は今後も拡充される予定である。これらの各文献を精読し観測 DB を作成した。観測 DB は基本的に「各流域での一連の調査」をひとつのデータとし、総計で 507 件となった。収集した文献の情報は日本水環境学会のノンポイント汚染研究委員会のウェブページに掲載、公表している¹⁶⁾。図 S1 にデータの一例を示す。観測 DB が含む内容は、地点や流域に関する情報 (地名や水系、流域面積など)、土地利用情報、調査方法と時期、対象物質、得られた原単位などである。本報ではここから原単位等にかかわる情報を抽出、整理し、代表値や影響因子を論じる。

そのため、まず一降雨の調査の詳細が明らかとなっている調査事例を観測 DB から抽出し、改めて降雨調査 DB を構築した (文献数 : 13 本 (表 S1 に文献リスト掲載), データ数 : 111)。この降雨調査 DB は一イベントにつき一データで構成される。イベントごとに抽出、整理した基本的な数値情報は、排水面積、人口密度、年降水量、調査日、先行晴天日、降雨量、流出高、流出率、EMC (BOD, COD, SS, TN, TP) である。ここで本研究では、EMC がノンポイント汚濁負荷の最も主要な負荷量の指標と考えた。EMC とはある流出地点での一イベントの流量加重平均濃度で、一イベントでの流出量 (Q_i) と濃度 (C_i) がある時間間隔 (Δt_i) で継続的に測定されている場合以下のように算定される：

$$EMC = \frac{\sum_i C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_i Q_i \Delta t_i} \quad (1)$$

これらの数値情報は文献の本文中に直接示されていない場合も多いが、本文から情報を論理的に読み取れる場合は独自に算定した (例 : 人口密度を排水面積と域内人口から算定、または EMC を濃度と流出量の経時変化から算定、など)。

EMC を指標とした考え方を説明する。原単位は $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で求めている事例も少なくないが、論文によ

って算定の方法論が異なるケースや、原単位として採用するには必ずしも調査回数が十分ではないと懸念されるものもあった。また一方、調査は実施しているが原単位を算定していないものも多い。そこで一降雨の調査の詳細が知られるものについて、その調査の詳細がデータベース化されることが望ましいという考えに至った。そこで各降雨の調査を単位としてDB化し、そのEMCを代表的な結果として示すこととした。原単位の多くはEMCと年間降雨量から求められている。そのため本質的にはEMCが元データであると考えられる。

2.2 EMCの分布の特性の把握と予測

EMCの分布の特性を把握した上で、それを踏まえてEMCに影響を及ぼす因子からEMCを予測する回帰式を算定した。まずEMCの分布は正規分布と対数正規分布へのあてはまりに関する検定をそれぞれ行い比較した。検定にはPearsonの χ^2 検定を用い、有意水準は5%とした。その結果いずれも正規分布にはあてはまらず対数正規分布にあてはまった(各変量の分布を図S2に示す)。EMCに及ぼす影響因子とEMCの予測では、EMCを目的変数、人口密度、先行無降雨期間、流出高、時間最大降雨強度を説明変数とした回帰分析を行った。回帰式としてはべき乗則を採用した(式(2))。また得られたEMCの推定値の対数変換したものを μ とする(式(3))。回帰は各変数をすべて対数変換したのちに重回帰分析を行った。重回帰分析の適用に先立ち独立変数間の多重共線性の影響の有無を分散拡大係数(VIF)<10を基準に判定したところ、VIFの最大値は2程度であり、いずれの変量も独立変数として採用できると考えた。変数減少法により変数を選択し、選択の基準をF値>2とした。計算には統計解析フリーソフトR 3.2.2を用いた。

$$EMC = a (\text{人口密度}^b \times \text{先行無降雨期間}^c \times \text{流出高}^d \times \text{時間最大降雨強度}^e) \quad (2)$$

$$\mu = \ln(EMC) \quad (3)$$

ここで流出に影響を与える降雨強度の表現として時間最大降雨強度を採用している。そのほかにも10分最大降雨強度、また流域の流出時間に合わせた時間を用いた表現など様々にありうるが、データの入手の容易さなどからこちらを採用した。流出率を変数に採用していないが、この理由は流出高の中に流出率の情報が含まれていると考えたためである。また降雨に関連する以外の因子は、地理的情報では人口密度としてまとめた。影響パラメータを設定する場合、上記の他にも主要な因子が考えられる。例えば、宅地、道路などの土地利用形態や、コンクリート、アスファルトなど表面工種も重要な影響因子である。これらも当初検討したが、整理したデータの報告書に示されていないものも多く採用に至らなかった。ま

た水質項目によっては西日本と東日本など地域で異なる地質土壌を反映した違いが生じていることも推測されたが、解析には十分なデータではないと考え採用しなかった。

2.3 EMCの予測モデル式と降雨データに基づく年間負荷量の予測

得られたモデル式および地理情報、降水データに基づいて、特定の流入域において年間降水パターンが生じた場合の単位面積当たりの市街地からの流出負荷を推定した。降水データは地域気象観測システムAMeDASの時間値を用いた。

2.4 調査回数による年間負荷量の推定精度のシミュレーションによる検討

得られたモデル式に基づいて、1年のうちどの程度、どのような降雨条件で採水をする、年間負荷量をどの程度の信頼度で得られるのかを予測した。そのため計算は2014年度東広島を対象として行った。予測モデル式に従って算出されたEMCデータと実際の気象データを用いて負荷量・流出量データを仮想的にそろえた。イベントごとのEMCは算術平均値と標準偏差にもとづいて対数正規分布に従うと仮定して与えた。次に、1年間のイベントの内(2014年東広島では全イベント数は112回)、ランダムに1~50回採取した場合の推定年間負荷量と実際の年間負荷量(EMCデータから用意された年間総負荷量)の比を算出した。また先行晴天日数3日以上かつ降水量2.5 mm以上のデータという条件で(2014年東広島では24回)ランダムに1~24回採取した場合の比についても算出した。ここで推定年間負荷量はサンプリング対象イベントの合計負荷量に調査対象イベントの合計流出量に対する年間総流出量の比を乗じることによって算出した。計算は、数値シミュレーションソフトCrystal Ball(Oracle社)を用いた100000回のモンテカルロシミュレーションによって行った。

3. 解析結果と考察

3.1 データ及び重要な諸元の指標値の範囲および特性

まず、得られたDBの調査情報について、筆者らが最も主要と考えた数値的な諸元とその範囲を示す(表1)。ただし調査結果として示すべき情報はこれらで十分と考えるわけではなく、十分な諸元の内容は図S1の内容と考える。得られた総データ数は前述の通り111であり、一方対象となった流域数は33である(ひとつの流域で複数回測定している場合は別のデータとしている)。調査時期は1988~2008年であった。また本研究では、解析を行うにあたり図S1に含まれていない内容として時間最大降雨強度を追加している。降雨強度が負荷流出に影響を与えると考えたためである。

続いてBOD、COD、SS、TN、TPのEMCの集計値を表2、図1に示す。25%値~75%値は数倍の範囲に収まっ

表1 データベースに含まれる降雨の諸元の範囲

	排水面積 (ha)	人口密度 (人 ha ⁻¹)	降雨量 (mm event ⁻¹)	先行無降雨期間 (day)	流出高 (mm event ⁻¹)	時間最大降雨強度 (mm hr ⁻¹)	流出率 (-)
データ数	108	60	111	108	107	108	110
平均値	111.98	71.33	15.58	7.17	5.83	4.29	0.41
25%値~75%値	8.2~67	30.49~106.27	6.5~17	2.35~6.69	1.6~8.05	2~6	0.19~0.49
最小値~最大値	0.89~3698	16.29~168.54	1~72.5	0.42~63	0.16~31.88	0.5~18.5	0.04~3.46

表2 各水質項目の EMC の範囲

mg L ⁻¹	BOD	COD	SS	TN	TP
データ数	26	102	83	73	73
平均値	7.87	11.62	55.0	2.26	0.154
中央値	5.55	9.12	39.8	2.10	0.120
幾何平均値	6.07	9.64	34.9	1.84	0.120
25%値～75%値	3.43～11	5.98～15.23	18.4～70.3	1.2～2.9	0.073～0.22
CV値 (%)	76	64	100	64	69

図1 各水質項目の EMC

表3 各水質項目の相関 (相関係数)

R	BOD	COD	SS	TN	TP
BOD	—				
COD	0.92*	—			
SS	0.16	0.64*	—		
TN	0.72*	0.53*	0.16	—	
TP	0.73*	0.76*	0.63*	0.54*	—

* 有意確率 < 0.05

表4 EMC の予測式 (本文の式 (2)) のパラメータおよび予測式の精度

	α	β	γ	δ	ε	R^2	σ	P
		人口密度 (人 ha ⁻¹)	先行 無降雨期間 (day)	流出高 (mm event ⁻¹)	時間最大 降雨強度 (mm hr ⁻¹)			
COD	1.28	0.118	0.622	—	0.284	0.40	0.433	$<1 \times 10^{-4}$
SS	19.6	—	—	—	0.474	0.15	0.967	2×10^{-4}
TN	0.971	—	0.385	—	—	0.22	0.598	$<1 \times 10^{-4}$
TP	0.0497	—	0.398	0.172	—	0.19	0.678	6×10^{-4}

— (ハイフン) は検定の結果採用されなかったパラメータ

(α , β , γ , δ , ε : 予測式 (式 (2)) のパラメータ, R^2 : 予測式の決定係数, σ : 予測式を基準にしたデータの標準偏差, P : 有意確率)

ている。代表値として (算術) 平均値, 中央値, 幾何平均値, 25% 値～75% 値を示した。また分布は前述の通りおおむね対数正規分布に従っていた。

3.2 EMC に及ぼす影響因子と EMC の予測

本報告の数値を用いて流域の年間負荷量を算定する場合, 最も単純な方法として得られた各 EMC の平均値に年間降雨量と平均流出率と流域面積を乗じるというやり方がある。一方, ある程度の地理情報と降雨情報が得られる場合, その情報に基づき各降雨の EMC の予測値の範囲を絞り込むことで, 積算される年間負荷量の精度をあげることが考えられる。そこで EMC の諸元に対する依存性の有無と関係性の定式化について考察した。

まず, 水質項目同士の相関を検討した (項目同士の散布図を図 S3 に示す)。そのため水質項目同士の相関係数を計算した (表 3)。BOD-COD 間には高い相関が見いだされた。SS と BOD または TN などは相関が低かった。BOD, COD, TN, TP はお互いに類似しており SS はそれらと類似性が低い傾向にあるといえる。

続いて人口密度, 先行無降雨期間, 流出高, 時間最大降雨強度と EMC との相関の有無を検討し, 回帰式を求めた。ただし BOD は重回帰分析を行うには十分なデータ

数ではないと考え (データ数 26; 表 2), 分析対象から除外した。BOD の EMC は COD と高い相関であったことから (表 3), 引き続き解析においても COD の解析で得られた傾向が BOD にもあてはまると考えている (なお BOD と COD の関係は $\text{BOD (mg L}^{-1}\text{)} = 0.76 \times \text{COD (mg L}^{-1}\text{)} - 1.9$ であった; $R^2 = 0.84$)。各水質項目に関する式 (2) の独立変数として採用された変数とその係数および R^2 , σ , P 値を表 4 に示す。回帰分析に際しては変数を対数化した値に対して行ったため, 得られた R^2 , σ は対数化した値に対しての決定係数と回帰直線を基準にしたデータの標準偏差である。 P 値よりいずれも有意な相関であった。いずれもすべての変数ではなく 1 つから 3 つの変数が独立変数として選択された。独立変数のうち人口密度のみが地理的な条件であるが, COD のみ人口密度との相関が見いだされた。また図 2 に予測値と実測値の値を示す。予測値と実測値は誤差最大 10 倍程度 (SS) で予測値の増加とともに実測値も増加する傾向にある。COD はある程度良好に見えるが, SS はばらつきも大きい。

各変数に対する依存性を記述するモデルとしては Sartor & Boyd による定式化¹⁷⁾ や中村による方法¹⁸⁾ などがある。本研究でもそれらの物理モデルの適用がより望

ましいと考えたが、これらのモデルに必須のパラメータである流出高が重回帰分析で TP 以外は相関があるとは判断されなかったこと、また異なる流域でのデータの寄せ集めに、経時変化のモデルをあてはめることは無理があると考えたことから、採用しなかった。

ここで得られた関係式は、パラメータの選択そのものは物理的な過程を考慮したものであるが、簡単な相関関係に基づく統計モデルであり、EMC の予測値としての適用にあたっては慎重さが求められる。さまざまな流域に適用しようとする場合、その流域における表 1 の値は 25% 値～75% 値か、少なくとも最小値～最大値の範囲に収まっていることが条件になると考えられる。

3.3 予測式の適用に関するケーススタディ

ここまでの解析では人口密度という流入域の地理情報を含めて行ったが、結果的に、COD が人口密度に依存したことを除いては降雨にかかわるパラメータのみが有意な予測パラメータとして残った。そこで降雨情報を重視し、日本における典型的な降雨パターンが与えられた際のモデル値の応答性について解析した。日本全国の複数の地点の降雨情報から、前記の式 (2) を用いて EMC および年間流出負荷量を算出し変動特性について検討した。まず、複数の地点の AMeDAS から得られた時間降雨量から、表 4 に示した回帰係数を与えた EMC 算定式を用いて年間流出負荷量を求めた。算定に際しての主要な仮定は以下の通り：

- ・年間流出量は各一降雨の EMC と流出高の積の、年間の合計値とした。
- ・EMC は場所によらず前記の EMC 算定式に従うものとした。
- ・一降雨の流出高は一降雨の降雨量と流出率の積とした。ただしここでは流出率は DB の平均値 (0.41；表 1 参照) を用いた。

・COD は流入域の人口密度に依存する結果であったが、計算に際しては DB の平均値 (71.33 人 /ha；表 1 参照) を用いた。

・一降雨は一続きの連続した降雨として定義した。時間降雨量データにもとづき無降雨間隔が 6 時間以内の場合その前後は降雨が連続していると見なした¹⁹⁾。

なお雨量データは降雪を含んでおり、降雪による負荷は本研究のモデルからは外れるため別途検討するべきであるが、ここでは簡単のためにすべて降雨として区別せずに取り扱っている。一般的な日本の気候区分^{20, 21)}を参考にし、各気候区分から選ばれるように、また、ノンポイント汚染の調査実施例が多いところと近いような地点、という観点を含めて検討した。ただし降雪が多い気候区分は対象から外して選択した。選択した地点は千葉、東広島、鹿児島、那覇 (すべてアメダス観測地点) である。計算期間は 2010 年 1 月 1 日～2014 年 12 月 31 日の 5 年間とした。各地点の期間中の降雨状況は表 5 に示すとおりである。

計算の手順を以下に示す。計算に先立ち AMeDAS の一時間毎の連続降雨データからイベント毎の一回降雨量、流出高 (降雨量に一定の流出率 (0.41) を乗じた)、先行無降雨期間、時間最大降雨強度を導出し、それらの連続したデータを得た。続いて以下のように計算した：

- ① 各降雨の EMC の対数平均値 (式 (3) の μ) および対数標準偏差 (表 4 の σ) を導出した。
- ② 各降雨の EMC の算術平均値および算術標準偏差を以下の (4)、(5) 式より求めた。長期的な負荷量の積算値や平均値を算定するための集約値としては対数平均値ではなく算術平均値が基本と考えたためである。

$$\text{各降雨の EMC の算術平均値} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (4)$$

図 2 各水質項目の EMC の予測値と実測値

表 5 対象降雨の諸元 (2010–2014 年)

	年降雨量	降雨回数	1 回降雨量	時間最大降雨強度	先行無降雨期間
			年平均 年最大	年平均 年最大	年平均 年最大
	(mm yr ⁻¹)	(event)	(mm event ⁻¹)	(mm hr ⁻¹)	(day)
千葉	1468	101	14.6 176	4.4 44.1	3.1 24.7
東広島	1483	94	16.1 144	4.2 31.9	3.3 20.8
鹿児島	2502	117	21.1 248	6.0 43.7	2.5 15.7
那覇	2481	149	16.6 317	6.0 57.2	2.0 16.2

値はいずれも年間代表値(平均値, 最大値)の5年平均値

各降雨の EMC の

$$\text{算術標準偏差} = \sqrt{\exp(2\mu + \sigma^2) \{\exp(\sigma^2) - 1\}} \quad (5)$$

③ 年間負荷量の期待値および標準偏差を以下のように算出した。まず年間負荷量の期待値について (6) 式より各降雨の流出負荷量を導出し、得られた流出負荷量の値の年間の合計を年間負荷量の期待値とした：

$$\text{各降雨の流出負荷量} = (\text{各降雨の流出高}) \times (\text{各降雨の EMC の算術平均値}) \quad (6)$$

年間負荷量の標準偏差については、以下の (7) 式より各降雨の流出負荷量を導出し、更に (8) 式により流出負荷量の標準偏差を導出した：

$$\begin{aligned} \text{各降雨の流出負荷量の} \\ \text{標準偏差} = (\text{各降雨の流出高}) \times (\text{各降雨の EMC の算術} \\ \text{標準偏差}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{年間の流出負荷量の標準偏差} = \\ \sqrt{\sum_{\text{年間}} (\text{各降雨の流出負荷量の標準偏差})^2} \end{aligned} \quad (8)$$

以上のすべての計算例はインターネット上のファイルで示している (URL: <http://home.hiroshima-u.ac.jp/ojaki/SI2.xlsx>)。本研究では実測値から予測式を導出し、それに基づき上記の手順で年間負荷量の標準偏差を算定した。ただし本研究で採用した年間負荷量の標準偏差の算定方法は厳密なものではなく簡略化した方法とした (テキスト S1)。以下の計算は各降雨の流出負荷量が表 4 の関係に従うと仮定している。

年間負荷量の例を表 6 に示す (表 S2 に全地点、全年

表 6 東広島を例とした汚濁物質の年間負荷量の例 (2014 年)

	年間負荷量 ^{*1} (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	変動係数 ^{*2} (%)
COD	40.5 ± 3.8	9
SS	507 ± 142	28
TN	9.1 ± 1.1	12
TP	0.76 ± 0.11	15

*1 数値は平均値±標準偏差, *2 数値は (標準偏差 / 平均値)

の結果を示す)。得られた標準偏差はモデルによる予測誤差と解釈できる。東広島の例では年間負荷量の予測値の変動係数は 9%~28%であった。図 2 に示されたように、予測値と実測値との関係が大きくばらついているにもかかわらず、変動係数は比較的小さかった。なお表 6 の結果自体は特定の地域、年に限った結果であるが、他の地点、年も変動が抑えられているという点で同様の傾向であった。予測値のばらつきが大きい回帰式を用いているにもかかわらず変動係数が小さくなる計算上の理由は、各降雨のばらつきが独立に生じると見なして年間の標準偏差を算定しているためである。降雨ごとの偏差が独立に生じるのであれば、たとえば 100 回の降雨の合計値の変動係数は $\frac{1}{\sqrt{100}}$ に減る計算になる。また、ここでの計算は流出率の変動は含まれていない点にも留意するべきである。

次に、計算結果の評価に先立ち計算に用いた個別の降雨の条件が、先に得られた DB の範囲にどの程度収まっているのかを検討した。そのため各降雨の諸元の範囲を表 1 と比較した。比較のため重要な諸元は降雨量、時間最大降雨強度、先行無降雨期間と考えた。ただし比較する範囲の項目は最大値のみとした。最小値を対象としなかったのは、降雨量、時間最大降雨強度については、それらの最小値が小さい降雨の、全体への影響は小さいと考えたためであり、先行無降雨期間はあらかじめ 6 時間より短い降雨は一連の降雨と見なしているため更なる制限は不要と考えたためである。結果を図 3 に示す。

各降雨について範囲を超えた項目はすべて降雨量または時間最大降雨強度であり、先行無降雨期間が範囲を超えていた降雨はなかった。実質的にはある程度以上の強い降雨の実データが欠けているということになる。全体により南の方が DB 範囲外の降雨量または流出負荷量が多い傾向にある。DB 範囲外の寄与が大きい鹿児島や那覇について、年ごとの変動を見たところ、年ごとに変動する大部分が DB 範囲外の降雨により生じている傾向が確認できた。DB の範囲を超える降雨は降雨の頻度としては大きくはなかったが (鹿児島、那覇であっても発生頻度は 10% 程度であった)、それらは強い降雨であり、計算上は強い降雨が変動成分を担っていると解釈される。

図 3 各地点の各降雨において本研究で用いた DB の範囲 (表 1 の降雨に関する条件) を超えている降雨による負荷の総量 (DB 範囲外) と総流出負荷量 (DB 範囲外 + DB 範囲内) (2010-2014 年の平均)

鹿児島や那覇など降雨が強い地点では絶対的な割合も過半であり、重要な寄与を占めている。つまり平均的な傾向についてはこれまで得られている調査結果に基づいた議論になるが、地域毎や年ごとの変動を議論することは調査を踏まえた実証的な議論を外れていることになる。限られたデータからできるだけ議論をして現時点での最善の暫定的な判断を得るという状況では、本研究での議論は一定の有効性をもつと考えられるが、今後は強い降雨での流出をより確実に把握し実証的な裏付けを得ることが重要である。またこういった年間の合計の負荷量を推定することを本計算によって実施する際には、このような範囲に含まれないような降雨の頻度とその計算上の負荷量はあらかじめ把握した上、最終的な判断は現場の状況の理解を踏まえて行われる必要があるだろう。

次に、計算をすべての地点、年について実施した結果を図4と表7に示す。図4を見ると年降雨量と時間最大高強度については、いずれも増加するにつれて負荷量も増加する傾向にある。TN、TPは時間最大降雨強度が予

測式に入っていないにもかかわらず時間最大降雨強度と高い相関を示している。これは年降雨量が高い地点では時間最大降雨強度も高い傾向があったためである。一方、先行無降雨期間については明確な相関は見られない。全体として、いずれも日本の気候の範囲では降雨パターンによらず降雨量や降雨強度が増えると流出負荷も増えると考えられる。

3.4 EMCの変動が年間負荷量に及ぼす変動の範囲の再検討

前節では東広島を事例として年間負荷量とその変動係数を計算した(表6)。この変動係数はももとの予測値と実測値のばらつきと比べて小さいように思われたが、その理由は前節でも述べたように、EMCの予測値からの変動が降雨ごとに独立に発生すると見なしたことで、流出率の変動を含んでいないことが考えられた。このうち、とくに独立性について考察する。本モデルで得られたばらつきは、実際には降雨ごとに独立であるとは限らない。例えば、降雨ではなく、流域毎に決まる因子のみが変動の原因であったと仮定する。その場合、同じ流域で複数の降雨のEMCを予測して負荷を算出する上で、変動が降雨ごとに相殺されることはない。そこで、現在得られている予測のばらつきは、流域を特徴付ける因子のみによって決まると考える(因子名をXとする)。Xはすでに本研究で採用している因子(人口密度(表4))とは相関しないとする、Xに起因する変動はランダムなばらつきとして観察される。同じ流域内であればXは同一であるため変動も降雨毎に同じになる。この場合、年間負荷量の変動係数は一降雨ごとのEMC予測値の変動係数と同一になり、変動係数は水質項目ごとに45%~124%

表7 全地域(千葉, 東広島, 鹿児島, 那覇), 年(2010-2014年)の汚濁物質の年間負荷量の平均(データ数は各20(4×5))

	年間負荷量 ^{*1} (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	変動係数 ^{*2} (%)
COD	61.0 ± 17.9	29
SS	885 ± 377	43
TN	11.8 ± 2.8	24
TP	1.07 ± 0.30	28

*1 数値は平均値±標準偏差, *2 数値は(標準偏差/平均値)

図4 降雨パターンとモデルから導出された各地域の年間負荷量(2010-2014年の各年)
(時間最大降雨強度と先行無降雨期間は各地点においてそれぞれの降雨の年平均値で示した。)

と計算される。これは表6の値より大きい。実際にはEMCのばらつきが全て流域ごとの違いに起因するとは考えられず、むしろ変動要因の大部分が、降雨条件に依存していると考えのほうが自然であろう（これは表6の仮定の考え方である）。しかしそのことを実証的に検討してはならず、本研究では捉えられていない少数の支配的な因子が大きく影響を及ぼして、測定ごとの相関に強く影響を及ぼしている可能性も否定できない。すなわち、表6の変動係数の値は過小評価されており、この点の検討も今後の課題である。

3.5 調査回数が年間負荷量の推定に及ぼす影響

本モデル式に基づき、現場で限られた回数の調査を実施しそこで得られたEMCから年間負荷量を推定する場合の、推定値の変動特性をシミュレーションにより求めた。本シミュレーションは東広島市の2014年の降雨および流出負荷量のパターンを例として計算した。ここでは、各降雨の負荷変動が独立であると見なして解析した。調査実施の判断に関して先行晴天日数3日以上かつ降水量2.5 mm以上という条件を設けた場合と、条件なしの場合とで推定された年間負荷量と実際の年間総負荷量（EMCデータから計算された年間総負荷量）の比を取った（図5）。調査の回数が多くなるにつれてばらつきが小さくなり、また同じ調査回数では条件ありの方が概してばらつきが小さくなった。SSのばらつきが大きくCODのばらつきが小さかったが、これは各項目の年間負荷量の変動係数の大小関係（表6）と同様の傾向であった。条件ありでは調査回数が増えても中央値は1には近づかなかった。これは、すべての降雨イベントの母集団から採取しているのではなく、降水量や先行晴天時間が一定以上のイベントのみで試料採取するという、調査方法によるものである。

ここで仮に「25%タイル値・75%タイル値が2倍以内（すなわち、50%の確率で2倍以内）を満たす調査回数」を、年間負荷量を精度よく推定するための最低限必要な調査回数と想定すると、条件なしではCOD, SS, TN, TP

の順に4, 10, 2, 5回だったのに対し、条件ありでは1, 6, 1, 1回であった（表8）。すなわちすべての項目について50%の確率で2倍以内の誤差となるように年間負荷量を推定したいのであれば、先行晴天日数3日以上かつ降水量2.5 mm以上のイベントならば6回以上、任意のイベントであれば10回以上の降雨調査が必要となる。これに対し、解析対象の2014年広島では、1か月あたり約9回のイベントがあった（1年間で112回）。このことから、調査によって得られたEMC、対象イベントの総流量、年間総流量のデータを用いて50%の確率で2倍以内の誤差となるように年間負荷量を推定するためには、約1か月のすべてのイベントでの調査が必要であることが示唆された。

一方、「25%タイル値・75%タイル値が2倍以内」（95%の確率で2倍以内）を、年間負荷量を精度よく推定するために必要なサンプリング回数と想定した場合、条件なしではCOD, SS, TN, TPの順に21, 48, 15, 22回だったのに対し、条件ありでは18, not available（24回すべてのイベントを採取しても2倍以内に収まらない）。15, 19回であった。これはすべての項目で95%の確率で2倍以内の誤差となるように年間負荷量を推定するためには、1年間のうち半分近くのイベントでの調査が必要であることを示している。すなわち、仮に1年間の約半分のイベントでのサンプリング調査に基づいて年間負荷量を算定した場合でも、95%信頼区間での変動の大きさが2倍程度生じることを踏まえた上で、実態把握や対策立案と

表8 汚濁物質の年間負荷量の算定にあたり一定程度以上の精度を得るための必要サンプリング回数（東広島、2014年）

	25%タイル値・75%タイル値が2倍以内		2.5%タイル値・97.5%タイル値が2倍以内	
	条件なし	条件あり	条件なし	条件あり
COD	4	1	21	18
SS	10	6	48	not available*
TN	2	1	15	15
TP	5	1	22	19

* 条件をみたすすべてのイベントを採取しても2倍以内に収まらなかった

図5 限られた回数の調査から推定された年間負荷量と年間総負荷量の比（モデルから算定された各降雨負荷量を用いて実施したシミュレーション結果；東広島、2014年）

いった評価を行わなければならない。またこの解析は対象地域と対象年を固定した上での結果である。対象地域が異なる場合や、同一地域でも気象条件の異なる年の年間負荷量を推定するのであれば、さらに異なる変動要因が生じることに注意が必要である。

4. まとめと今後の展望

(1) 人口密度、先行無降雨期間、流出高、時間最大降雨強度を変数とし、年間流出負荷の予測値とその変動係数を算出する方法を検討した。またそれに基づき日本全国で複数の地点で降雨量の経時変化に基づき単位面積当たりの汚濁流出負荷量を算定した。今後地域的、長期的な傾向を議論するための基礎になり得ると考えている。一方、変動要因の考察に基づき本研究で得られた変動係数はモデルの仮定によって大きく異なる可能性も示唆された。この点は今後の検討課題と考えられる。また得られたモデル式の妥当性の検証も今後の検討課題である。

(2) これまでの調査の範囲に含まれない強い降雨の割合が大きく、その分の寄与が、とくに変動分として大きい事がわかった。これらの強い降雨の調査は安全面などから実施が難しいことが多い。しかし結果に与える影響が大きいことを考えると、リモートによる観測などを利用し、実証的な情報を集めていくことが今後重要であると考えられる。また積雪地域については積雪や融雪の影響を別途考える必要がある。

(3) 本研究では、対象地域で調査された EMC、対象イベントの流量、年間総流量から年間負荷量を推定する場合、年間のおよそ半分のイベントでのサンプリングを実施したとしても、95%信頼区間で2倍程度のばらつきが生じることが示唆された。このことは、原単位を精緻に測定するためには、きわめて重厚な調査データを要することを意味する。重厚な調査データの獲得ならびにモデル化による推定手法の確立を進めると共に、変動の大きさを考慮した上で実態把握や対策立案といった評価を実施することが求められる。

本研究では得られた DB に基づき解析を実施した。解析実施に先立ち降雨ごとの EMC を基本的な集約情報と見なし、一般に原単位として用いられる「単位面積あたりの年間負荷量」(表7)を導出した。単位面積あたりの年間負荷量は、例えば流域の状況とともに変化することが想定される。現在、技術的、社会的な要請としては、対策のための技術や制度によってどのように汚濁流出負荷が削減され、管理できるかという点が重要になっている。これらの要請に応えるためには、本研究で実施した EMC に影響を及ぼす因子の解明に加えて、多様な地表面種ごとの原単位の調査といった調査、物理モデルの活用などが求められる。

謝 辞

本研究の成果は国土交通省下水道技術研究開発(GAIA プロジェクト)によるものである。記して感謝の意を表す。また本研究で用いたデータベースは環境省環境研究総合推進費(RFb-11T1)の成果に基づくものである。本データベースの収集に当たっては多くの自治体関係者のご協力をいただいた。またその整理は多くの研究者のご努力によるものである。論文作成において広

島大学理学研究科の藤越康祝教授ならび若木宏文教授に統計解析実施に関するアドバイスをいただいた。記して感謝の意を表す。

付録：補足資料

補足資料は下記より閲覧可能である。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jswe/-char/ja/>

(原稿受付 2016 年 3 月 30 日)

(原稿受理 2017 年 1 月 19 日)

参 考 文 献

- 1) 和田桂子, 藤井滋穂, 2006. 雨天時における路面排水の水質特性および汚濁負荷の流出挙動に関する研究. 水環境学会誌 29 (11), 699-704.
- 2) 新矢将尚, 小西孝明, 宮西弘樹, 石川宗孝, 2002. 高速道路排水における汚濁負荷の流出特性. 用水と廃水 44(3), 207-213.
- 3) 尾崎則篤, 鴈田孝広, 福島武彦, 山口登志子, 2000. 市街地への多環芳香族炭化水素類の地表面堆積とその降雨時流出. 環境工学研究論文集 37, 403-409.
- 4) 熊谷香, 内藤剛, 2007. 有明海福岡県地先への栄養塩供給量の動向. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 17, 73-80.
- 5) 反田實, 原田和弘, 2012. 瀬戸内海東部(播磨灘)の栄養塩環境と漁業. 海洋と生物 34(2), 132-141.
- 6) 環境省, 2015. 瀬戸内海環境保全特別措置法の一部改正. URL. http://www.env.go.jp/water/heisa/setonaikai_law_rev/kaiseiho-zenbun.pdf (2016 年 1 月時点).
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 2015. 下水放流水に含まれる栄養塩類の能動的管理のための運転方法に係る手順書(案), p.113.
- 8) SWAT Developer's Google group, 2016. SWAT (Soil and Water Assessment Tool). URL. <http://swat.tamu.edu/> (2016 年 11 月時点).
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 2015. 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説. URL. http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000311.html (2016 年 11 月時点).
- 10) 環境省 水・大気環境局水環境課, 2014. 非特定汚染源対策の推進に係るガイドライン(第二版). URL. <http://www.env.go.jp/water/kosyou/hitokutei/index.html> (2016 年 11 月時点).
- 11) 千葉県, 2003. 平成 14 年度環境省委託業務結果報告書 非特定汚染源負荷削減計画策定調査.
- 12) 建設省土木研究所下水道研究室, 1980. 分流入下水道からの雨水流出水に関するデータベース. 土木研究所資料 第 1549 号.
- 13) 建設省土木研究所下水道部水質研究室, 1989. 汚濁負荷の原単位に関する調査報告書(1). 土木研究所資料 第 2766 号.
- 14) 松本順一郎, 1984. 非特定汚染源による汚染防止対策調査報告書-文献調査-. 昭和 59 年度環境庁委託業務結果報告書. 社団法人水質汚濁研究協会, 東京.
- 15) 古米弘明, 2012. 非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究. 平成 23 年度 環境省環境研究総合推進費成果報告書(RFb-11T1). 社団法人日本水環境学会, 東京.
- 16) 日本水環境学会ノンポイント汚染研究委員会, 2016. 非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究. URL. <http://jswe-nonpoint.com/h23suishin/index.html> (2016 年 11 月時点).
- 17) Sartor, J.D., Boyd, G.B., 1972. Water pollution aspects of street surface contaminants. USEPA, EPA-R2-72-081.
- 18) 中村栄一, 1993. 雨水流出水による汚濁負荷の流出特性. 下水道協会誌論文集 30(364), 1-13.
- 19) 村上道夫, 古米弘明, 中島典之, Jinadasa Haltota K.P.K., Aryal Rupak K., 2008. 降雨特性の異なる 66 降雨における雨水浸透施設からの浸透量の評価. 用水と廃水 50(3), 227-233.
- 20) 沼山翔, 土屋十園, 2005. 日本の気候区分の再評価に関する研究. 第 18 回(2005 年度)水文・水資源学会総会・研究発表会, セッション ID: P-89. DOI: 10.11520/jshwr.18.0.162.0
- 21) 小泉和也, 加藤史之, 2012. 気候要素の変動パターンに基づく日本の気候区分. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要 47, 185-197.

〔論文要旨〕

雨天時における市街地流出を調査している報告書、論文等の文献を収集し（1968～2011年）、一降雨を単位とした市街地の汚濁負荷（BOD, COD, SS, TN, TP）の負荷流出データベース（DB）をまとめ、一降雨の流量加重平均濃度（EMC）の分布を明らかにした。続いて降雨条件、地理的状況がEMCに及ぼす影響を回帰式で予測し、日本全国の4地点での降雨条件を与えた際の年間流出負荷の予測値とその変動係数を導出した。その予測に基づき、信頼性のある流出負荷量を算出するためにどの程度の降雨の採水頻度が必要になるのかをシミュレーションにより検討した。95%信頼区間を2倍以内程度の誤差とする場合、水質項目によっては年間の全降雨イベントのうち半分程度を採水する必要があることを明らかにした。

キーワード：EMC（event mean concentration）；有機物；SS；栄養塩類；原単位