

月一回の定期水質調査による流出負荷量推定の限界について Limitations of load estimation based on monthly water quality monitoring

○川村純, 多田明夫, 田中丸治哉

○Jun KAWAMURA, Akio TADA, Haruya TANAKAMARU

1. はじめに 閉鎖性水域の富栄養化問題には、水域への正確な流入推定量に基づく合理的な水質汚濁対策が必要である。水域に流入する河川の総流出負荷の不偏推定のためには、負荷量の期待値の大きさに比例した確率 (PPS) で抽出された標本が必要である¹⁾。このため、我々の研究室では SIR 法 (Sampling Importance Resampling) を用いて、既存のデータから PPS 標本を再抽出して負荷量を推定する手法を開発した²⁾。この手法により、月一回の定期水質調査データから年総流出負荷量の推定を試みてきたが、推定量に大きな偏りが生じる場合があった。本研究では、この偏りの改善を目的として、10 年分の月一回の定期調査データから各年の流出負荷量の推定を試みた。10 年の期間長であれば、定期調査データでも高水データが含まれるようになり、LOWESS 回帰を用いた RC (Rating Curve) に基づく SIR 推定により、より正確な推定が期待されるためである。

2. 方法 2.1. 解析データ 検証データとして、米

Heidelberg 大学 National Center of Water Quality Research (NCWQR)³⁾が Web 上で公開する、米エリー湖周辺の 4 流域 (C : Cuyahoga, M : Maumee, H : Honey, R : Rock) から水質 5 項目 (SS, TP, SRP, NO₂₃; NO₂+NO₃⁻, TKN) について、数十年間の日単位水質データを用いた。Table 1 に流域名とその土地利用割合を示した。また流量データには、米地質調査所 (USGS)⁴⁾の日平均流量データを用いた。この中から、欠測率が 10%未満の連続した 10 年間分の合計 429 組のデータセットを評価に用いた (Table 2)。

2.2. 解析手法 10 年分の検証データから月一回の定期調査に相当する月一回のランダム抽出を行い、RC により瞬間負荷量 \hat{l} を推定する。これまでの我々の研究では、RC としてべき乗型 LQ 式 $\hat{l}=aq^\beta$ (M1, q は流量, α , β は回帰パラメータ) を用いていた¹⁾が、長期のトレンド変動により評価年毎に RC パラメータが異なるため、各年でパラメータを決定していた。これに対して本研究では、米国の水質評価で利用されている次式の WRTDS モデル⁵⁾ (M2) を用いた。

$$\ln \hat{l} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 \ln q + \beta_3 \sin(2\pi t) + \beta_4 \cos(2\pi t) \quad \dots (1)$$

ここで、 t は一年の長さを 1 とした時間項、 $\beta_0 \sim \beta_4$ は偏回帰パラメータである。このモデルは、数年分のデータの存在を前提として、長期間のトレンド・季節性・流量の三つを重みとした LOWESS 回帰を用いる。このように二つのモデル M1, M2 で求められた \hat{l} に基づいてそれ

(所属) 神戸大学大学院農学研究科 Graduate School of Agricultural Science, Kobe University
(キーワード) 流出負荷量, 不偏推定, 定期調査, SIR, WRTDS

Table 1 Watershed summary³⁾

流域	面積(km ²)	土地利用割合(%)		
		農地	森林	都市
C	1,830	21	34	40
M	16,388	80	7	11
H	386	83	10	7
R	89.6	80	11	9

Table 2 データセットの内訳

流域	評価データセット数				
	SS	TP	SRP	NO ₂₃	TKN
C	17	17	14	17	15
M	29	29	7	14	29
H	26	22	31	31	19
R	26	26	13	21	26

ぞれ SIR 法によるリサンプリングを行い、水文年（10月～翌年9月）毎に流出負荷量 \hat{L} を推定した。リサンプリングでは、SIR 法により定められる重みに基づき、棄却法により標本集団を抽出する。この標本集団に対し危険率 5% で積算負荷量軸上での一様乱数列に対する AD 検定⁶⁾を行い、一様乱数列ではないと判断されなかったものを PPS 標本として推定を行い、棄却された場合を推定不能とした⁷⁾。以上の試行を 5,000 回繰り返して点推定と区間推定の評価を行った。負荷量の点推定量の偏りについては、 $pBIAS(\%) = (E[\hat{L}] - L_{ref}) / L_{ref} \times 100$ ($L_{ref} = \sum_{i=1}^N l_i$) が $\pm 10\%$ 以内で概ね不偏と判断した。区間推定については 95% 信頼区間を bootstrap-*t* 法で構成し、被覆確率（信頼区間内に真値が含まれる割合）が 90% 以上で概ね適切に信頼区間が構成されているものとした。

3. 結果および考察 3.1. 点推定量の偏りと被覆確率の結果

Fig.1 と Fig.2 に、 $|pBIAS|$ と被覆確率の M1 と M2 による合計 4,290 個の結果の分布を示した。これらの図では、青色の占める割合が大きい手法ほど良いことを示す。二手法の結果を比較すると、M2 の方が点推定と区間推定の両方で優れており、長期間の定期調査データにおいて WRTDS による \hat{l} の推定と SIR を行うことで、推定結果が全体的に改善したことが分かる。

3.2. 月一回の定期調査による負荷量推定の限界 Fig.3 に M2 での流域毎の推定不能率の分布を示した。この図では、濃い色の占める割合が大きいほど、その流域で推定不能率が大きいことを示す。Rock 流域では約 7 割のデータセットで推定不能率が 80% を上回った。推定不能率は、流量分布の変動幅が広いデータセットで大きくなった。そのような流域での定期調査データの流量分布は低水側に偏りやすいため、リサンプリングすべき PPS 標本がそもそも得られにくい。そのため、定期調査データを複数年分集めても、推定値の不偏性の改善は不十分であった。

4. 結論 本研究の結果、月一回の定期調査データを 10 年分集めても、WRTDS モデルと SIR を組み合わせることで、べき乗型 LQ 式と SIR の組み合わせよりも各年の推定量の偏りは改善するものの十分ではなく、特に流量分布の幅が大きいと SIR では推定不能となる場合も多かった。そのため、より正確かつ確実な流出負荷量の推定のための水質調査法としては、月一回の定期調査ではなく、流量比例サンプリングなどの高水側のデータが収集できる方法が望ましい。

参考文献 1) Tada A. & Tanakamaru H. (2021) : Unbiased Estimates and Confidence Intervals for Riverine Loads, *J. Am. Water Resour. Res.*, 57(3), 028170, 2) 多田明夫, 田中丸治哉 (2020) : 改良 IR 法による負荷量推定, 第 69 回農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 129-130, 3) NCWQR : <https://ncwqr.org/monitoring/data/>, 2021/3/15 閲覧, 4) USGS : <https://waterdata.usgs.gov/nwis/sw>, 2020/12/4 閲覧, 5) Hirsch R. M. (2010) : Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), with an Application to Chesapeake Bay River Inputs, *J. Am. Water Resour. Res.*, 46(5), 857-880, 6) Anderson T. W. & Darling D. A. (1952) : Asymptotic Theory of Certain "Goodness-of-Fit" Criteria Based on Stochastic Processes, *Ann. Math. Stat.* 23(2), 193-212, 7) 川村純, 多田明夫, 田中丸治哉 (2020) : 米国の 12 流域の水質データによる流出負荷量不偏推定法 IR 法の検証, 第 69 回農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 131-132

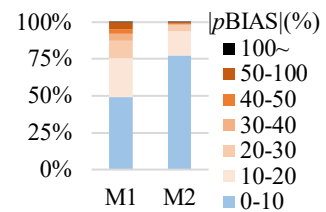


Fig.1 $|pBIAS|$ の結果の分布

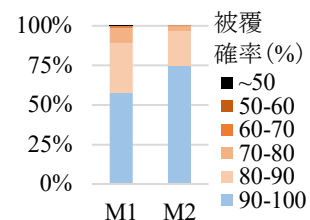


Fig.2 被覆確率の結果の分布

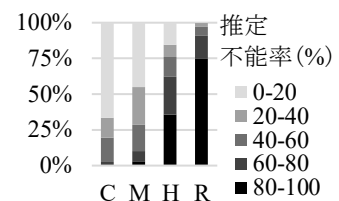


Fig.3 流域毎の推定不能率の分布