

## 週次程度の採水頻度に基づく年河川負荷量の推定について Estimation of annual river load based on approximately weekly samples

○大西 健太, 田中 健二, 多田 明夫  
○Kenta ONISHI, Kenji TANAKA, and Akio TADA

**1. はじめに** 河川負荷量を正確に推定することは、閉鎖性水域などの水環境の状態を把握する上で重要である。月1回の低頻度サンプリングから得られる年間12個の標本を前提として、Horvitz-Thompson (HT) 推定を利用した年河川負荷量の不偏推定法とその信頼区間の構成法が提案されているが、信頼区間幅が広い上にその被覆確率（信頼区間が真値を含む確率）も信頼水準を下回る場合があった<sup>1)</sup>。この問題を改善するために HT 推定量と rating-curve (RC) 法を組み合わせた推定量である BCRE (bias correct regression estimator) が開発されたが、12.14ha の山林小流域で2日に1回程度の採水頻度の標本を用いて BCRE による年河川負荷推定量を計算したところ、懸濁態成分を含む項目で依然不確かさが大きいことが示された<sup>2)</sup>。このように、月2～15回程度の中～高頻度での水質観測データに対する精度の高い年河川負荷量の推定法はこれまで十分に検討されていない。

本報告では Weighted Regression on Time Discharge, and Season 法<sup>3)</sup> (以下 WRTDS) を参考に、年48個（月4個、おおむね週1個程度）の標本を対象として、局所線形回帰（以下 loess 回帰）RC による精度の高い年河川負荷推定法について報告する。

**2. 推定法** WRTDS は低頻度長期間データを前提とする、トレンド、季節、流量の3種の重みを用いた loess 回帰により、年河川負荷推定量の不確かさの削減を目的としたモデルである。本報告で使用する loess 回帰 RC では単年度のみのデータの使用を前提としているので、流量の重みのみを導入する。本報告では loess 回帰に用いる RC として次の2種類について評価した。

$$\ln c_{RCi} = \beta_{0i} + \beta_{1i} \ln q_i + \beta_{2i} i \sin 2\pi T_i + \beta_{3i} \cos 2\pi T_i \quad (1)$$

$$\ln c_{RCi} = \beta_{0i} + \beta_{1i} \ln q_i + \beta_{2i} \ln q_i^2 + \beta_{3i} i \sin 2\pi T_i + \beta_{4i} \cos 2\pi T_i \quad (2)$$

$$w_j = \left(1 - \left(d_j / h\right)^3\right)^3, \quad d_j = |\ln q_j - \ln q_i| \quad (3)$$

ここで  $c_{RCi}$  は  $i$  日目に対する RC による河川濃度推定値、 $q_i$  は河川日流量、 $q_j$  は  $c_{RCi}$  の回帰に利用する  $j$  回目の日流量、 $T_i$  は1年の長さを1とした基準時刻から  $i$  日目までの経過時間、 $\beta_{0i} \sim \beta_{4i}$  は  $i$  日目のデータに対する偏回帰係数、 $w_j$  は重み、 $d_j$  は対数流量値間の距離、 $h$  は半窓幅である。また、最終的な推定濃度は  $c_{RCi}$  に偏り修正係数を乗じて計算する、なお式(2)は対数流量値の2次項を含み式(1)よりも被覆確率の向上が期待できるため、検討に加えた（ただし、信頼区間幅が広がる可能性がある）。式(3)の  $w_j$  の値は半窓幅  $h$  の値に依存する。 $h$  の値は、 $T_i \pm h$  の範囲内にちょうど全ての観測値が含まれるように  $i$  日目の回帰ごとに設定した。

**3. 評価方法** 検証には米国エリー湖に流入する Honey 流域（面積 386km<sup>2</sup>）河川の日位の水質・流量データを利用した。年河川負荷量の計算年度は 2007 年であり、各

（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） 週次採水、年河川負荷量、loess、信頼区間、被覆確率

月から 4 個の日水質データをランダムに選択した年間 48 個のデータから、年河川負荷量を計算した。評価する項目は SS, TP, SRP, TN, NO23, TKN, Cl, SO4, Si, EC の 10 項目で、Monte Carlo 法により母集団から年 48 個の標本を 500 組リサンプリングして推定量（信頼区間）の信頼性を評価した。不確かさの定量的指標である信頼区間は bootstrap パーセンタイル法により計算した。信頼区間の信頼性の評価には 5~95% の範囲で 5% ごとの 19 段階の信頼水準に対して、被覆確率と信頼水準の差の標本標準偏差（差の残差平方和／19 の平方根、PE）、95% 信頼区間の被覆確率 ( $Cv_{95}$ )、真値の大きさを 1 とした 95% 信頼区間の相対信頼区間幅 ( $rCIW_{95}$ ) を用いた。なお HT 推定量についても bootstrap パーセンタイル法による信頼区間の評価を行った。本報告では PE で 5% 以下、 $Cv_{95}$  が 0.90~1.00% の範囲にある場合に信頼しうる推定が行われ、 $rCIW_{95}$  が狭い（1.0 以下の）場合に精度の高い推定が行われていると判断した。

**4.結果および考察** Table1 に、3 種の推定方法による信頼区間の評価指標の値を示した。信頼性が低い、あるいは信頼区間が広すぎる結果については網掛けをしている。HT 推定量では PE が 5% を上回る項目が多く、年 48 個の水質データでは信頼しうる推定が行えないことが示された。loess 回帰を用いた場合には年 48 個の水質データでおむね信頼しうる結果が得られた。式（1）の結果は式（2）に比べ精度が高く、 $Cv_{95}$  の値が信頼水準に関して信頼水準に満たない場合であってもその値は 90% に近い値を示している。このことから、年 48 個の水質データから年河川負荷量を推定するには式（1）の利用が適していると判断した。しかしながら、SS に対しては、どの推定方法でも精度の高い推定値が得られなかった。なお式（1）・（2）の選択については、今後より多くのデータセットと採水頻度での検討が必要である。

**Table1** 河川負荷推定量の信頼区間の標本標準偏差 (PE)、被覆確率 ( $Cv_{95}$ )、95% 信頼区間 ( $rCIW_{95}$ )

推定法	項目	SS	TP	SRP	NO23	TKN	TN	Cl	SO4	Si	EC
HT 推定量	PE	2.47	4.83	6.63	13.4	5.6	11.4	11.8	19.5	11.9	16.7
	$Cv_{95}(\%)$	0.89	0.94	0.93	0.99	0.93	0.97	0.98	1.00	0.99	0.99
	$rCIW_{95}(\%)$	1.35	0.92	0.78	0.63	0.93	0.72	0.42	0.41	0.68	0.49
loess (1) 式	PE	5.45	3.02	2.64	2.43	4.80	1.35	4.56	1.21	2.42	2.76
	$Cv_{95}(\%)$	0.93	0.89	0.91	0.92	0.94	0.95	0.87	0.95	0.92	0.91
	$rCIW_{95}(\%)$	1.33	0.30	0.33	0.23	0.28	0.18	0.19	0.08	0.23	0.08
loess (2) 式	PE	4.36	0.91	4.52	5.15	1.34	1.51	2.59	1.40	1.53	1.68
	$Cv_{95}(\%)$	0.97	0.96	0.97	0.97	0.95	0.96	0.91	0.95	0.95	0.93
	$rCIW_{95}(\%)$	4.62	0.92	0.69	0.27	0.66	0.26	0.29	0.08	0.37	0.10

#### 参考・引用文献

- 1) Tada, A. and Tanakamaru, H. (2022) : Unbiased Estimates and Confidence Intervals of Riverine Loads for Low-Frequency Water Quality Monitoring Strategies, Water Resource. Resour., 58(5), e2022WR031941.
- 2) 多田明夫, 田中丸治哉 (2024) : 高精度な河川負荷推定のための水質観測設計 -自動採水器を用いた山林小流域での事例研究- 農業農村工学会論文集, 318, II\_9-II\_15
- 3) Hirsch, R.M., Moyer, D.L. and Archfield, S.A. (2010) : Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), with an application to Chesapeake Bay river inputs, J. Am. Water Resour. Assoc., 46 (5), 857-880.