

山林小流域からの懸濁物質の総流出負荷量の区間推定について Interval estimation of suspended solids loads from a small forested catchment

○ 栗林由佳, 多田明夫, 田中丸治哉

○ Yuka KURIBAYASHI, Akio TADA, and Haruya TANAKAMARU

1. はじめに 懸濁物質(suspended solids, SS)の流出は, 土砂の流亡や, SSに吸着した栄養塩類の流出でもある. このため SS の流出負荷量の精度良い把握が水環境の保全の観点からも大切である. しかしながら, 自然河川の SS 濃度変動は, 流量に対し強い非線形性とヒステリシスを有し, かつ出水ごとのばらつきも大きい. このような場合, 定期的なサンプリングよりも確率論にもとづくサンプリングが総流出負荷量の推定には効率的であろう. そのような方法の一つに SALT(Selection At List Time)サンプリング法^{1,2)}がある(以下 SALT 法). 以上の背景から, 本報告では山林小流域からの SS の総流出負荷量の精度良い区間推定法を確立することを目的として, 区間推定法に SALT 法を導入しその有効性を検証した.

2. 使用データ 解析に用いた SS 濃度と流量のデータは, 奈良県五條市の山林流域(12.82ha)において 2009 年 6 月 1 日~2010 年 12 月 9 日に得られた 10 分間隔のデータである. この SS 濃度は, 10 分間隔の後方散乱式濁度計の濁度と自動採水機による SS 濃度の観測値間の回帰に基づく推定値である. ただし, 得られた濁度の観測値は中・低流量時に値が検出限界以下(ゼロ値, 全データの約 97%)であったので, 濁度の値がゼロの場合には SS 濃度は欠測扱いとした. すなわち, 全データは残りの 3%の期間に対する 10 分間値であり, その総数は 2702 個である. 本報告ではこれをデータ母集団とした. この点が前報²⁾と異なる. Fig.1 にこの母集団の流量と SS 流出負荷量の関係を示す. なお, 本報告では母集団全ての 10 分間値の SS 流出負荷量の積算値を総流出負荷量の真値 L_{true} として扱う.

3. 負荷量の区間推定法 負荷量の区間推定法は標本サンプリング法と, 負荷量算出法, 信頼区間構成法から構成される. **(1) 標本サンプリング法:** ランダムサンプリング(以下 RS)と SALT 法について検討を行った. RS の標本抽出数 n_{RS} は平均的な採水間隔がそれぞれ 1 月, 2 週間, 1 週間, 2 日, 12 時間に相当するよう, 18, 39, 79, 278, 1,112 個とした. SALT 法ではまず, 事前の調査データにもとづき, 瞬間流出負荷量の推定量 \hat{l}_i を求める. 推定量 \hat{l}_i は(1)式のべき乗型の LQ 式により求められる(q_i は瞬間流量の観測値, a_0, a_1 は定数, i は観測時刻). このため, SALT 法では事前調査データが必須である. 本報告では, 18, 39, 79, 278, 1,112 個を事前調査データ数 n_{pre} とした. 次に, (2)式に従って母集団からの標本サンプリングを実施する(N は期間中の総単位時間数, X は同期間の総流出負荷量の推定値). SALT 法

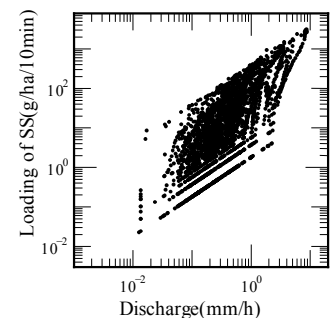


Fig.1 流量と SS 流出負荷量
Discharge vs. SS loading

$$\ln \hat{l}_i = a_0 + a_1 \ln q_i \quad (1)$$

$$p_i = \hat{l}_i / X, \quad X = \sum_{i=1}^N \hat{l}_i \quad (2)$$

$$\hat{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\hat{l}_i} \times X \quad (3)$$

(所属) 神戸大学農学研究科, Graduate School of Agricultural Science, Kobe University

(キーワード) 懸濁物質, 総流出負荷量, 区間推定, サンプリング, SALT 法

では負荷量の大きさに応じてサンプリングを行うため、(2)式の p_i は時刻 i にサンプリングが行われる確率である。具体的にはまず最初に流域からの期間中の総流出負荷量 X とサンプル数 n を仮定し、次にモンテカルロ法により $[1, X]$ の区間で n 個の一様乱数を発生させる。この乱数の値が区間 $[\hat{\Sigma}l_j, \hat{\Sigma}l_j^{i+1})$ に含まれていれば、時刻 i においてサンプリングを行う。本報告では、 n は 18, 39, 79, 278, 1,112 個とした。**(2)負荷量の算出法**：RS により抽出された標本集団に対しては、(1)式による推定値の合計を総流出負荷量値 L とした。 a_0, a_1 は、最小自乗法（以下 LS 法）および非線形最適化手法³⁾（以下 NLP 法）により決定した。また、SALT 法により抽出された標本集団に対しては、(3)式により総流出負荷量の推定値を求めた。**(3)信頼区間構成法**：ブートストラップ法（BCa 法）を採用した。ブートストラップ反復回数は 2,000 回とした。

4. 総流出負荷量推定法の評価 区間推定法の良否は、500 組の区間推定結果のうち真値をその中に含んだ割合（カバー率）により判断した。今回は 95% の信頼水準の区間推定の良否を検討した。

5. 結果および考察 Fig.2 より、サンプリング法に RS を採用し、 a_0, a_1 の決定に LS 法を適用した場合、標本数に関わらず負荷量は過小推定され、期待されるカバー率は得られていない。また、 a_0, a_1 の決定に NLP 法を適用した場合、 a_0, a_1 の決定に LS 法を適用した場合と比べて、標本数に関わらず過小推定は改善されている。しかし、期待されるカバー率は得られていない。これは、RS で得られた標本集団には偏りが生じていることが原因であろう。また、Fig.3 より、 $n=1,112, 278, 79$ の場合、SALT 法は、 n_{pre} に関わらず偏りの小さい推定値、信頼水準に近いカバー率を与えている（Fig.2 と Fig.3 の縦軸のスケールが異なることに注意されたい）。

しかし、 $n=39, 18$ の場合、カバー率は信頼水準を満たしていない。

以上より、標本数が多い場合には、SALT 法は SS の総流出負荷量の精度良い区間推定法であることが明らかとなった。今後はどの

程度の標本数が精度良い推定に必要であるかを検討していく必要がある。

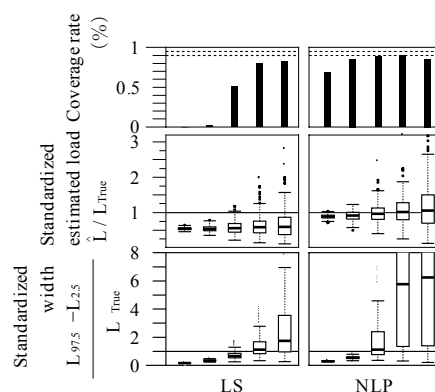


Fig.2 サンプリング方法に RS を採用した場合の区間推定結果
Result of interval estimation (Random Sampling)
LS は、LS 法による a_0, a_1 の決定、NLP は、NLP 法による a_0, a_1 の決定を表す。各グラフ中の 5 つの棒グラフは、左から準に $n=1,112, 278, 79, 39, 18$ の場合に対応する。また、 $L_{97.5}, L_{2.5}$ はそれぞれ総流出負荷量の 95% 信頼区間の上限値と下限値である。

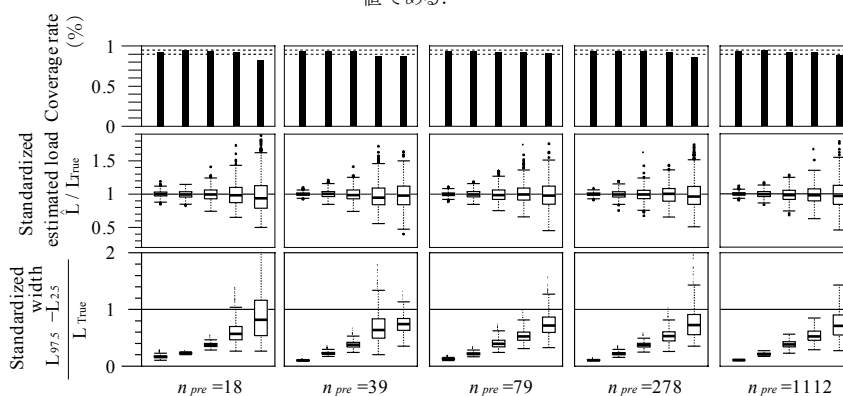


Fig.3 サンプリング方法に SALT 法を採用した場合の区間推定結果

Result of interval estimation (SALT sampling)
各グラフ中の 5 つの棒グラフは、左から準に $n=1,112, 278, 79, 39, 18$ の場合を表す。また、その他の記号は Fig.2 に同じである。

[参考文献]1) Thomas, R. B. (1985) :Estimating total suspended sediment yield with probability sampling. Water Resour. Res, 21: 1385-1388.,2) 多田明夫・田中丸治哉(2011):確率的サンプリングを利用した打ち切りデータに基づく懸濁物質負荷量の区間推定, 平成 23 年度農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.228-229.,3) 角屋陸・永井明博(1980) :タンクモデルと SP 法による最適同定, 農土学会誌, 48(12), pp51-59.