

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05828

研究課題名(和文) 面源負荷量推定の一般化手法の開発

研究課題名(英文) Development of a generalized method for nonpoint source load estimation

研究代表者

多田 明夫 (TADA, Akio)

神戸大学・農学研究科・准教授

研究者番号：00263400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：河川の年間負荷量は点源と面源から排出され、後者は土地利用と関連している。土地利用と河川負荷量の関係を、多くの国のモニタリングで採用されている長期の月1度の低頻度水質モニタリングデータと日流量データから、Horvitz-Thompson推定量とRating Curve(RC)法に基づいて、統計的に適切かつ従来よりも高精度に推定する方法を開発した。

この開発手法を用いて、多様な土地利用構成比を持つ複数の流域に対して、年単位RCのパラメータや平均水質濃度を土地利用構成比から推定する方法を開発した。概ね偏りの少ない推定結果が得られたが、推定値の不確かさが未だ大きいという課題も残された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、多くの国で採用されている月1度程度の低頻度の水質モニタリングデータから、年単位の河川を流下する物質や水質濃度を偏りなく精度良く推定する手法が開発されていなかった。本研究はこの手法を開発し、多くの水質モニタリング地点での長期データを利用することで精度の高い推定を実現した。この推定法に基づき、日本と米国の複数流域のデータから土地利用と年単位の流量と河川流下物質の関係式や、河川水質濃度を偏りなく推定する方法も開発した。推定精度に改善の余地があるが、これらの方法は人間活動が水環境に与える影響の定量評価と水質管理に利用することができる。

研究成果の概要(英文)：Annual river loads are contributed by point and nonpoint sources and the latter is correlated with land use. A statistically appropriate and more precise method for estimating the relationship between land use and river loads was developed based on the Horvitz-Thompson estimator and the rating curve method, using long-term monthly low-frequency water quality monitoring data and daily flow data. Monthly sampling are commonly employed in monitoring in many countries.

Using the method developed named as the bias-corrected regression estimator (BCRE), we further developed a method for estimating parameters of the inter-annual rating curve or average concentrations of river water quality from land use ratios for several watersheds with different land use ratios. The estimated values gave generally unbiased results, but there is still a problem that the uncertainty of the estimated values is still large.

研究分野：地域環境工学

キーワード：Horvitz-Thompson推定量 BCRE 10年平均年河川負荷量 低頻度 長期モニタリング 年単位LQ式

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2020年当時、1年間といった長期間に河川を流下する物質の総量である負荷量(河川負荷量)を、公共水域で行われているような低頻度の水質モニタリングデータと日単位の流量から、偏りなく精度良く推定する方法は存在していなかった。それまでに提案され利用されていた方法は、国内外を問わず、全て偏りが無視できない(偏った)推定量であった。このため、公共水域の水質モニタリングデータを用いて従来の負荷量推定法で計算された河川負荷量や水質濃度に基づいて、水質状況のトレンド評価や水質に与える面源の影響評価を行うことは、誤った推論を与える恐れがあった。

一方で、面源負荷量が河川水質に与える影響を評価するために、単一の土地利用を持つ集水域から決定した面源原単位に面源別土地利用面積を乗じて積算する方法(原単位法)が一般的であるが、この原単位の値が様々なばらつきを持つため、原単位法の限界が指摘されていた。このため、原単位の積算ではなく、逆に広域的な面源負荷量の積算値である大河川の末端での年負荷量や平均水質濃度の観測値から流域スケールで平均化された面源の影響を定量的に推定する必要があった。そのような試みがいくつか見られていたが、先に述べた問題からその結果の信頼性に大きな問題が残されていた。

国内外を問わず、公共水域の水質モニタリング地点では年間12~20回程度の水質モニタリングデータが数十年にわたり蓄積されてきており、これらのデータから年河川負荷量や平均水質濃度を偏りなく推定することができれば、先に述べた問題を解決できると期待された。そのような不偏推定法を用いれば、数百km²の流域レベルの複数河川の河川負荷量の不偏推定量から、面源ごとの原単位推定の実現も期待された。

研究申請時であった2020年の時点で、申請者は河川負荷量の不偏推定法の開発を相当部分進めており、そのような手法をいよいよ公共水域の水質モニタリングデータに適用しうる段階にあった。特に汚濁物質を含め、河川水質濃度変動の大きさが流量変動の大きさに対して相当小さなこと(chemostaticな特性)が多く、多くの研究で報告されており、もしその仮定が十分に妥当であれば、年負荷量 L_T と年流量 Q_T から構成される年単位LQ式(rating curve, $L_T = \beta_0 + \beta_1 Q_T$, β_0, β_1 は偏回帰係数)の傾き β_1 が流域河川の長期的な年平均濃度(average mean concentration; AMC)となることから、複数流域のAMCと土地利用の関係から、土地利用毎に原単位に相当する面源の水質濃度を推定できる可能性があった。

2. 研究の目的

以上の背景を受けて、申請時における研究目的は、以下のものであった。

(1) 流域特性値としてのAMCの妥当性の検証; 原単位に代わる流域特性値として、AMCが妥当か検討する。あわせてAMCの決定手順やその不確かさの算定方法などを確立する。

(2) AMCと土地利用の間の定量的関係の確認; 上記のデータおよび米国や我が国で公開されている月1回の水質データと時間・日単位の流量データを基に、流域土地利用とAMCの定量的な関係を調べる。面源負荷量を土地利用から説明しうるのか、それが国や地域により異なるのかを検討を行う。

(3) 原単位法に代わる面源負荷量の推定法の提案と、その代表特性値の設定; (2)で定量的関係が見出されれば、総流出量の年ごとの変化に対応しうる、より合理的で広域の特性を代表する土地利用毎のAMCの設定を行う。

3. 研究の方法

本研究の検証のためには(最低でも)日単位の流量データと水質濃度データが数十年分必要であるため、米国のHeidelberg大学が提供するエリー湖への複数の流入河川の長期間の日単位流量と水質濃度観測値、米国地質調査書(USGS)の提供する日単位あるいは低頻度の水質データおよび日単位流量データを開発手法の検証に利用した。一方で、開発手法の適用性の確認のために、我が国の水質水文データベースが提供する月1回の水質データと時間単位の流量データを利用した。

研究申請段階では年河川負荷量の不偏推定法として、不偏推定法である重点的サンプリング法を、既存標本に対するSIR(sampling/importance resampling)法によるリサンプリングで実現する予定であった。ただし、この方法で得られる河川負荷量の信頼区間が非常に広いため、10年間の(L_T, Q_T)データによるLQ式を求めることで、不確かさを抑制する方針であった。しかしながらその場合でも年単位LQ式のパラメータ β_0, β_1 の不確かさが大きいため、より精度の高い年河川負荷量の推定法の開発を、米国流域の日単位水質・流量データと我が国一級河川の長期低頻度水質データを用いて並行して進めた。

このようにして開発された、偏りの少ない、そして従来法よりも高精度な年河川負荷量の推定値を用いて、年河川負荷量と年河川流量の関係である年単位LQ式に関して、米国の9流域の複数水質項目(懸濁物質SS, 全リンTP, 溶存反応性リンSRP, 全窒素TN, 亜硝酸塩+硝酸塩NO_{2,3}, 総ケルダール態窒素TKN, 塩化物イオンCl, 硫酸塩SO₄, ケイ素Si)について、chemostaticな

$L_T = \beta_0 + \beta_1 Q_T$ モデルを含めてどのようなモデルが成立するかを検証し、モデルパラメータと流域土地利用の関係を調べ、面源負荷量の推定における原単位法のように土地利用から年河川負荷量を推定しうるかどうかを調べた。

4. 研究成果

上記の目的と方法論に従って、本研究では以下の成果を得た。

4.1 河川負荷量の精度の高い推定法の開発成果

2021 年度に、様々なサンプリング方法で収集された水質モニタリングデータを用いても、普遍的に不偏推定量を与えることのできる Horvitz-Thompson (HT) 推定量に基づく負荷量推定法を開発した。この方法に基づいて bootstrap-t 法により信頼区間を構成する方法も開発し、成果を国際誌に発表した。しかしながらこの方法でも月 1 度といった低頻度データの場合懸濁態項目を中心として、十分に年河川負荷量の推定値の不確かさを小さくできなかった。このため、さらに高精度の推定を目指して HT 推定法と水質濃度と流量の定量的関係式である Rating curve (RC) による推定法を組み合わせた負荷量推定法である bias-corrected regression estimator (BCRE) を 2022 年度に開発し、成果を 2023 年度に論文発表した。この方法は厳密な不偏推定量を与えないが、漸近的な不偏推定量を与え、従来の HT 推定量と比較してより精度の高い負荷推定量を与えることができる。これらの手法の妥当性と有効性は、米国の複数流域からの 25 流域・年の日単位水質濃度・流量データセット(各データセットは 6~9 水質項目を含む)を用いて検証された。

4.2 長期低頻度データに基づく精度の高い年河川負荷量の推定に関する成果

まず 2021 年度に、我が国の一級河川である揖保川の公共水域観測点での長期の月 1 回の低頻度水質観測データを用いて、HT 推定量に基づく河川負荷量の推定を行い、その精度について検証結果を公表した。その結果、月 1 度程度の低頻度データでは負荷量の推定精度が低いため、10 年間平均の年河川負荷量を評価することで、負荷量の推定精度を高めることが可能であることを示した。しかし、依然として大きな不確かさを伴う推定結果が得られることも示された。これらの成果は論文発表されている。

このため、2023 年度にはより精度の高い推定量である BCRE に基づいて、同じ揖保川の公共水域データの長期低頻度モニタリングデータを用いた年河川負荷量の推定を行い、負荷量の推定精度の向上に関して検証を行い、成果を論文発表した。この結果、多くの項目で推定精度の向上(信頼区間幅の削減)が可能となったが、一部の懸濁態項目ではかえって不確かさが増大していた。なお米国のデータセットに対する検証結果でも同様の問題は見られたが、多くの場合で河川負荷量の推定精度の向上が認められ、この成果も論文発表した。

4.3 年単位 LQ 式と土地利用の関係についての成果

以上の成果を受けて、森林・農地・市街地の土地利用面積構成比に大きなばらつきを持つ米国の 9 流域からの日単位水質・流量データセットを用いて、年単位 LQ 式のモデル形式について検討した。そこで明らかになったのは、年単位 LQ 式としては、多くの懸濁態項目や汚濁項目で chemostatic なモデル($L_T = \beta_0 + \beta_1 Q_T$)は成立せず、従来と同様のべき乗型モデル($L_T = \beta_0 Q_T^{\beta_1}$)が適切であり、この結果 AMC をモデルパラメータから決定するのは困難である、という点である。またこのべき乗型年単位 LQ 式のモデルパラメータは、各年における日単位データから推定されるべき乗型 LQ 式とは異なるモデルパラメータを有することも明らかとなった。さらにこのモデルパラメータの値が土地利用面積比から重回帰モデルにより説明可能であることも示された(図 1 参照)。

このべき乗型年単位 LQ 式の母集団パラメータ $\beta_0 \cdot \beta_1$ の値は、年 12 個程度の低頻度の水質観測値からも偏りなく推定可能であることも示された(図 2 参照)が、そのような低頻度データに基づく場合推定誤差が大きく、モデル推定精度の実用性には課題が残されている。これらの成果は論文として 2023 年度に公表された。

以上より、推定精度に課題は残されたものの、低頻度の水質モニタリングデータに基づいて、土地利用面積比から年単位の河川負荷量や平均水質濃度を推定することが可能であることが示され、その方法論を構築することができた。

4.4 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

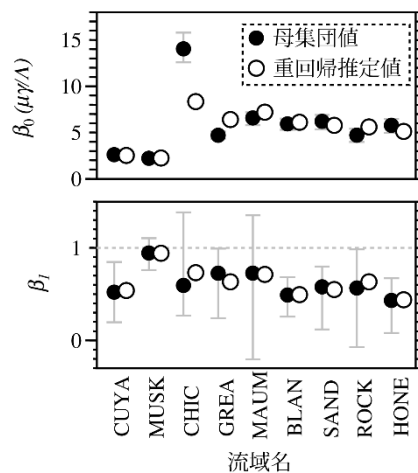


図1 年単位 LQ 式の母集団パラメータ値(●)と土地利用から推定したパラメータ値(○)(米国の 9 流域での TN の長期観測データの例), β_0 の値は濃度に換算されている。

国内外を通じ、低頻度長期データに基づいて精度の高い偏りの小さな河川負荷量の推定法をはじめて確立することができた。これにより、従来蓄積されてきた公共水域の長期低頻度データに基づき適切な河川負荷量の推定値を計算することが可能となった。また流域レベルの年単位の LQ 関係からは、特に汚濁物質と懸濁物質を中心に、chemostatic なモデルが成立せず、非線形モデルが必要なこと、そしてその関係は個々の年の観測値で見られるモデルパラメータとは異なることが明らかにされ、年単位 LQ 式に線形モデルを想定するような従来の楽観的なデータの総括方法に疑問を提示した。欧米や中国などの農業生産国では、農地に起用した肥料流亡による河川と閉鎖性水域の富栄養化が深刻であり、他方、我が国でも貧栄養問題の対策を含めた流域レベルの物質管理が必要とされており、そのような問題の対策立案にとってここで開発された偏りの少ない精度の高い年河川負荷量の推定法は非常に有益であり、そのインパクトは大きい。

4.5 今後の展望

今回開発された、低頻度データに基づく年河川負荷量の精度の高い偏りの小さな推定手法開発のインパクトは国内外を問わず相当に大きい。しかしながら、河川負荷量の推定と評価の研究では、そもそも河川負荷量の推定値の不確かさが大きく、従来の負荷量推定法はそれを適切に評価し得ないという問題意識が十分深刻に共有されておらず、相変わらず LQ 式 (RC) の精度を高めれば偏りの小さな高精度の負荷量推定値が得られるという楽観的意見が未だ支配的であり、問題提起を更に進めなくてはならない。また今回開発した手法でも未だ大きな不確かさが得られるため、現実に水質モニタリング地点で蓄積されている長期低頻度データに基づく、更に精度の高い年河川負荷量の推定法を引き続き開発する必要がある。それらの手法を我が国の一級河川データに対して適用し、各種面源の河川負荷量に与える影響をより高精度かつ合理的に評価する研究を発展させる必要がある。なぜならば、そのようにして、特に陸域からの物質供給の観点から、内湾や湖沼などの閉鎖性水域の水環境に人間が与える影響を初めて適切に評価できるようになるためである。

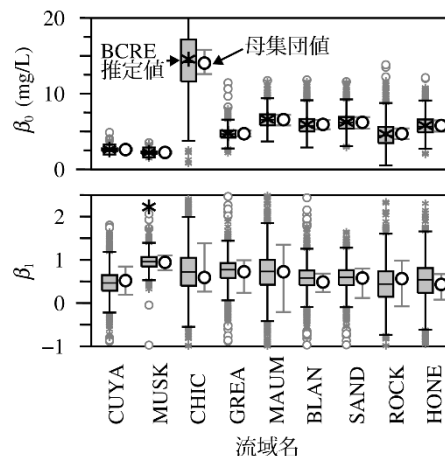


図2 年単位 LQ 式の母集団パラメータ値 (○) と月 1 度の低頻度長期間観測値から BCRE 年負荷量推定値に基づいて推定したパラメータ値の分布 (箱ひげ図) (米国の 9 流域での TN の長期観測データの例), β_0 の値は濃度に換算されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 多田明夫, 田中丸治哉	4. 巻 92(1)
2. 論文標題 高精度な河川負荷量推定のための水質観測の設計 自動採水器を用いた山林小流域での事例研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 11_9-11_15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.92.11_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 多田明夫, 田中丸治哉	4. 巻 92(1)
2. 論文標題 公共用水域水質データによる年河川負荷量の推定法について 揖保川上流域の事例研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1_1-1_12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.92.1_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 多田明夫, 田中丸治哉	4. 巻 91(2)
2. 論文標題 年河川負荷量推定のための効率的な水質モニタリング法と推定量の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1_221-1_230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.91.1_221	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 多田明夫, 田中丸治哉	4. 巻 91(2)
2. 論文標題 年単位河川負荷量の流出特性について	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1_193-1_202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.91.1_193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 多田明夫, 田中丸治哉	4. 巻 91(2)
2. 論文標題 年間河川負荷量の精度の高い信頼区間の構成法について 低頻度定期水質モニタリングを前提として	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_165-I_174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.91.I_165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akio TADA, Haruya TANAKAMARU	4. 巻 58(2)
2. 論文標題 Unbiased Estimates and Confidence Intervals of Riverine Loads for Low Frequency Water Quality Monitoring Strategies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022wr031941	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 多田明夫, 田中丸治哉	4. 巻 90(2)
2. 論文標題 長期低頻度データによる10年間平均の年河川負荷量の推定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I-279, I_290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.90.I_279	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 多田明夫, 田中丸治哉
2. 発表標題 低頻度データからの長期間平均年間河川負荷量の推定
3. 学会等名 米国地球化学連合2023秋季大会(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 多田明夫, 田中丸治哉
2. 発表標題 河川負荷量推定のための効率的な水質モニタリング法の検討
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会 2023年度研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 脇山渚, 田中丸治哉, 多田明夫
2. 発表標題 公共用水域河川水質モニタリングデータによる河川水質特性の評価
3. 学会等名 2023年度(第72回)農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 多田明夫, 田中丸治哉
2. 発表標題 年間河川負荷量の正確な信頼区間の提案
3. 学会等名 2023年度(第72回)農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 多田明夫, 田中丸治哉
2. 発表標題 モデルアシスト手法による小標本に基づく負荷推定量の不確かさの縮小について
3. 学会等名 2022年度 AGU 秋季大会(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田明夫, 田中丸治哉
2. 発表標題 河川流下負荷量の不偏推定とその区間推定について
3. 学会等名 第25回 日本水環境学会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田明夫, 田中丸治哉
2. 発表標題 Horvitz-Thompson 推定量による河川負荷量の不偏推定
3. 学会等名 2022年度 (第71回) 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田 明夫・田中丸治哉
2. 発表標題 年負荷量と年流量の関係について
3. 学会等名 第70回農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------