

平成 31 年 4 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K07646

研究課題名(和文) 既存の水質モニタリングデータに基づく面源汚濁負荷量の不偏推定法の開発

研究課題名(英文) Development of unbiased estimation method for nonpoint pollutant load based on the existing water quality monitoring data

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水質の定期モニタリングデータと連続的な河川流量の観測値に基づいて、重点的サンプリングに基づく標本抽出法とべき乗型LQ式法を組み合わせることで、河川を流下する汚濁負荷量の偏りの無い推定量とその不確かさ(信頼区間)を提示することのできる方法を初めて開発した。基となる定期調査データの頻度が低いと十分に推定が行い場合があるものの、様々な河川・水質項目に適用しうる汎用的な方法が開発できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農地や市街地・道路などの面源や山林などのバックグラウンド土地利用から発生し河川を流下する汚濁物質の総量は流出負荷量と呼ばれる。これは下水道計画や内湾・湖沼の水質汚濁対策の基礎数値であるが、その推定量の確からしさについては統計学的にも妥当な議論がなされておらず、汚濁対策の有効性に大きな疑義を与え続けてきた。本研究は、行政や研究機関で収集・保存されている定期水質モニタリングに基づく既存の水質データに基づいて、流出負荷量の偏りの無い推定量と、その推定の不確かさ(信頼区間)を適切に与えることのできる方法を初めて開発したものであり、本手法によりより適切に閉鎖性水域の水質汚濁対策が講じられよう。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed the generally applicable unbiased estimation method of non-point pollutant load based on the existing periodical water quality data and high-frequency discharge data using the combination of power-law rating curve method and importance re-sampling method, for the first time. This method can also provide confidence intervals of the load estimates as a measure of uncertainty. Although in case of small sample sizes importance re-sampling sometimes fails, this method is universal one applicable to various rivers and water quality parameters.

研究分野：地域環境工学・計画学

キーワード：面源 汚濁負荷量 流出負荷量 定期調査 定期モニタリング 不偏推定 信頼区間

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

原単位や閉鎖性水域、海洋への汚濁物質の流入量を正しく把握することは、水域の流域レベルの水質管理に欠くことができない。集水域からの物質流出量（流出負荷量；特定の期間中に集水域から発生・流出する物質の総量）の把握に用いられるべき乗型 LQ 式（Rating curve, 瞬間流量と瞬間負荷量の間に認められる対数線型モデル）による流出負荷量推定量の不確かさについては 1970 年代から疑義が呈され、このため 1980 年代以降推定量の偏りの修正法、サンプリング法の推定量への影響など、様々な論文が数多く発表された。しかしながら、1940 年から現在に至るまで、偏りのない流出負荷量の推定法、確からしさの適切な評価方法は提案されていない。この問題に対し、研究代表者らは効率的なモンテカルロ数値積分法である重点的サンプリング法(Importance sampling 法・IS 法)を LQ 式法と組み合わせた偏りの無い負荷量の点推定法とその適切な区間推定法を初めて開発し、それを RCM (Rating curve method) using IS 法と名付けた。ただし、IS 法では瞬間負荷量のサンプリングが、その予測される大きさに比例して行われる確率(Probability proportional to size, PPS)で行われねばならない。しかし一般的に、水質データはそのような方法で収集されておらず、一般的には月 1 度程度の定期モニタリングで収集されているに過ぎない。従って、これまで様々な研究・行政機関で蓄積されてきた水質観測データが RCM using IS ではそのまま利用できない、過去の長期モニタリングデータの価値が、負荷量や原単位評価という観点では、失われることになる。

以上の経緯より、これまで国内外で蓄積されてきた水質観測データに基づいて、RCM using IS 法を援用することで、流域からの流出負荷量の不偏な点推定と区間推定を行う方法を開発し、従来のデータの再活用と原単位の再評価を促す必要がある。あわせて、今後新規に原単位調査を行う場合の有効な調査法を再度提案する必要がある。

### 2. 研究の目的

琵琶湖や霞ヶ浦、東京湾等をはじめとする閉鎖性水域の水質管理の出発点は、水域に流入する汚濁負荷量の把握である。農地や市街地などの面源やバックグラウンドの山林などからの流入物質量は原単位で評価されているが、この値の信頼性は低く、また行政による水質汚濁対策の樹立時における利用も困難であり、そのために対策・施策の効果が疑問視され、結局の所、面源対策の有効性を毀損している。本研究は、過去これまでに収集された定期的な水質・流量のデータを元にして、偏りのない原単位の点推定量とその信頼区間を提供するプログラムの開発を第一目的に、またそのような推定量を新たに得るための現地観測法の確立を第二目的としており、これを通じて国内外の流域水質管理の障害となっている流入負荷量の定量的評価手法の抜本的改善を図るものである。

なお研究の前提として、調査対象とする河川について、流量は水位などから連続的に、あるいは十分な高頻度で、その観測値が得られるものとし、水質試料のみが採水と分析労力のため頻度を高めることができない状況を想定している。このような条件は一般的なものである。

### 3. 研究の方法

上記の 2 つの目的に応じて、方法を説明する。

#### (1) 従来の水質観測データに基づく流出負荷量の不偏推定法の開発

定期モニタリングデータや、降雨出水時の詳細調査データなどに基づき、IS 法を適用して、偏りのない流出負荷量とその信頼区間を提示するための方法論とプログラムの公表を行う。データによっては推定量を得ることができないケースも生じるため、推定量を得ることができない原因についての診断と情報提供も行える手法を開発する。

具体的には、負荷量の不偏推定に必要な瞬間負荷量の推定量 ( $I_{est} = \alpha q^\beta$ ,  $\alpha \cdot \beta$  はパラメータ,  $q$  は瞬間流量) の大きさに比例したサンプリングが RCM using IS の推定量が不偏である根拠となっているので、定期調査データなどで収集された既存の標本集団から、PPS となっているような標本だけを取り出す(リサンプリング)する事で、事後的に RCM using IS を適用することができる。この手法を Importance resampling (IR) 法と名付ける。上の条件の場合、 $I_{est}$  の大きさに比例する確率とは結局  $q^\beta$  の大きさに比例した確率であり、そのような PPS 標本は積算負荷量軸  $\Sigma q^\beta$  上で一様乱数として分布しているという特性を持つ。従って、既存データから PPS 標本をリサンプリングするためには、積算負荷量軸  $\Sigma q^\beta$  上で一様分布と見なせる標本のみを抽出すれば良い、というのがこの手法の考え方である。

問題はこれをどの様にして実現するか、である。少なくとも数列が一様分布に近いかどうかを判断するための、何らかの指標が必要となる。この指標として、我々は適合度検定量である Anderson-Darling (AD) 検定量  $A^2$  を利用することとした。この量は、一様乱数列に対しては 0.15 ~ 6 程度の範囲の値をとり、等間隔の数列に対してはこの中でより低い範囲での分布となっている。一方で、一様乱数や等間隔分布などの様に、空間上で等確率で分布しない確率分布の場合、 $A^2$  の値はより大きな値をとる傾向がある。従って、 $A^2$  の値がある基準値を超えない、すなわち非超過確率  $p$  に対応する  $A^2$  の値である  $A^2_p$  以下となる様な数列を、元々の既存データの標本からリサンプリングすれば良い。問題はこの  $p$  をどの様に定めるか、である。基本的には、高頻度の流量データと仮想的な LQ 式パラメータ  $\alpha \cdot \beta$  および回帰の残差分散  $\sigma^2$ 、ならびに正規乱数を用いて作成した、回帰分析の残差の理想条件(平均ゼロの正規分布に従い、系統誤差と不均一分散を持たず、互いに独立)を満足する仮想的な標本集団を用意し、様々な条件

で採集された水質データをその仮想データから再現抽出し、そのデータに対して IR 法を適用し、信頼水準に対して十分な被覆確率を持つ信頼区間を構成しようとするような p 値をモンテカルロシミュレーションで決定することになる。実際に奈良県五條市の小山林流域について、このような手続きで決定された p 値は 5%であった。

#### (2) 適切な流出負荷量推定のための現地観測法の開発

市販の ISCO 社の自動採水機などは、河川水位から流量を計算し、この計算の一定積算値毎に採水を実施する機能を有している。この水位 - 流量換算式のパラメータを調整することで、IS 法に基づいた、新たに流出負荷量を求めるための現地サンプリングが可能である。当然 RCM using IS に基づいて、水質サンプリングを PPS サンプリングで実現する必要がある。

ここで問題となるのは、観測開始時にどのように瞬間流出負荷量と流量の関係式(LQ 式)を設定するのか、開始時に設定した関係式が実際の観測データの関係式と異なる場合どうするのか(大きく異なると推定量が偏り、統計的推定の効率が低下する)、LQ 式が異なる複数の水質項目に対して、1 台の自動採水機と採水アルゴリズムによってどのように推定を行うのか、の 3 点である。このうち、効率的なサンプリング法として、LQ 式の指数パラメータ  $\beta$  を 1、すなわち瞬間負荷量と瞬間流量が比例するというシナリオに基づいた自動採水機による PPS サンプリングを提案する。何故ならば多くの水質項目で、この  $\beta$  の値は 0.7~2.0 強の値をとることが報告されているため、 $\beta$  の値を 1.0~2.0 のいずれかに設定することが効率的な IR 法の適用を可能とするためである。については、上で考案した IR 法で PPS 標本を既存標本集団からリサンプリングすることで対応できるであろう。

以上の課題に対して、2009 年度~2014 年度に、奈良県五條市の小山林流域で得られた 10 分単位の高頻度流量データと水質データ(SS,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Na^+$ )を用いてモデルや手法を開発し、合わせて本研究で同流域に設置された 2 台の自動採水機を利用して、提案された採水アルゴリズムを 2015-2016 年度の 1 年半にわたり実施し、複数の水質項目(SS, TN, DTN,  $NO_3^-$ -N, TP, DTP,  $PO_4^{3-}$ -P, COD, DCOD,  $SiO_2$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ )について、一定積算量(流出高 5mm 毎)のサンプリングを行った。比較のため、 $\beta = 0$ 、すなわち定期サンプリング(間隔は 48 時間)も同時に並行して実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 従来水質観測データに基づく流出負荷量の不偏推定法の開発

上記に手続きで決定した  $A_{2.5\%}^2$  による IR 法は、定期調査データに対しても、一定積算流量データに対しても、PPS 標本集団が基の標本集団からリサンプリングされれば、概ね信頼水準である 95%に相当する被覆確率を与えることができた。これにより、既存の水質データから不偏な負荷量の推定や適切な信頼区間を構成することが可能となった。この手法の成功が意味するところは大きく、単に既存のデータからの推定が可能となるというのみでは無く、データの間で成立する LQ 式のパラメータ  $\beta$  と PPS 標本収集の時に利用された  $\beta$  の値が異なっても、IR 法により負荷量の不偏推定が可能となることを意味している。これにより、1 台の採水機で  $\beta$  の値が異なる複数の水質項目の負荷量の不偏推定とその信頼区間の構成が可能となる。そればかりで無く、RCM using IS で課題であった、PPS サンプリング設計時に設定した  $\beta$  の値と、実際に流域の改変などによりデータ収集時の  $\beta$  の値が異なる場合の推定量の偏りも解消できることになる。また PPS 標本収集時に何らかの機器トラブルにより一部欠測データ期間が生じたとしても、この IR 法によることで、不偏推定を行うことも可能となる。

この方法の課題は、必ずしも既存の標本集団からの PPS 標本の抽出率が高くないこと、特に元の定期調査データの標本数が少ないときに、PPS 標本を抽出できる確率が小さくなる事である。そのような場合には推定自体ができなくなる(RCM using IS による推定には最低でも 4 個の PPS 標本が必要である)。もう一つの課題は、例えば実際の水質データの持つ LQ 式パラメータの  $\beta$  値が 1 だとして、定期調査( $\beta = 0$  での PPS サンプリングに相当)であっても、 $\beta = 0.9$  の PPS サンプリングデータに対しても、同じ  $A_{2.5\%}^2$  を利用することが非効率なことである。予想されるとおり、後者の場合、 $A_{2.5\%}^2$  よりもより緩やかな基準、例えばなどでも不偏推定が可能である。しかしながら、どの様な条件で p 値を調整できるかについてはまだ十分な検討ができていない。このため、IR 法は PPS サンプルの抽出効率にも課題を残していた。

### (2) 適切な流出負荷量推定のための現地観測法の開発

次に、上で確立された IR 法に基づいて、一定積算流量毎(流出高で 5mm 毎)の流量比例サンプリング標本による複数項目の信頼区間推定を行った。この結果、すべての項目で適切に信頼区間を構成することができた。比較のために 2 日毎の定期採水データに対しても IR 法を適用したが、抽出された PPS 標本の数が一定積算流量時に比べてずいぶん小さくなるため、その信頼区間は非常に広くなる傾向が認められた。これは LQ 式周りの残差分散が大きな項目と、LQ 式のパラメータ  $\beta$  が 1 からより大きな方に離れた項目で認められた。従って、一定積算毎の採水が、市販の自動採水機を用いて実現可能であることから、効率的な河川の流出負荷量の推定のためのサンプリング法として推奨される。なお必要となる標本数は、LQ 式周りの残差分散の大きさからシミュレーションにより推定することができる。

なお従来研究機関では定期調査に加えて、河川流量の増大する降雨イベント時に補強的に高流量時の水質データを観測し、それにより LQ 式の精度を改善し、負荷量の推定量の精度を向上させようとしてきた。これに関しても高頻度データと IR 法により、そのような特定の降雨

イベントデータの追加は、多くの場合負荷量推定量を偏らせ、不確かさの推定も不適切なものにすることが示された。これは LQ 式による回帰残差が互いに独立ではない、すなわち系列相関が必ず存在することに起因している。我々が通常観測する水質データは低頻度で系列相関について配慮することがほとんど無いが、実際に 10 分や 1 時間といった時間間隔の高頻度水質データ（瞬間負荷量データ）においては、LQ 式の残差にかなり高い自己相関係数を持つ系列相関が必ず伴っている。このような場合に、特定の降雨イベントデータを追加して解析することは推定量を偏らせることが、数値シミュレーションからもあきらかにされた。定期調査でも一定積算流量毎のサンプリングでも良いが、何らかの特定の $\beta$ に基づく PPS サンプリングと見なせる方法で水質試料がサンプリングされていることが、負荷量の不偏推定には重要であるとまとめることができる。

### (3) IR 法の改良

最後に、論文公表の遅れに伴い研究期間を 1 年延長したが、その結果、(1) にあげていた IR 法の課題を解決することができ、最終的により標本の再利用効率の高い、流域を選ばない汎用性の高い手法が開発できた。この改良は、IR 法の基となっている RCM using IS 法の理論的な不偏性の解釈から導かれたものである。すなわち、RCM using IS 法で PPS 標本が不偏推定を与えることができるのは、LQ 式の残差について回帰分析の古典的仮定が成立することと流量が対数正規分布であることによる。実際の流量データは対数正規分布に従わない。このため、定期調査の水質試料採取時の PPS 標本の試料採取パラメータ $\beta (=0)$ が、実際の水質項目の LQ 式の指数パラメータ $\beta'$ と一致するときのみ、ロバストな不偏推定量が得られる。従ってこの $\beta$ と $\beta'$ の差の大きさ、および $\beta'$ 自体の不確かさの大きさにより、IR 法での PPS 標本の再抽出の基準となる、AD 検定量の非超過確率  $p$  の値が決定されることが明らかになった。この知見を基に、各定期調査標本データ毎に、Monte Carlo 法により、適切に  $p$  値を決定することができ、これにより、より多くの PPS 標本が得られるようになった。また  $p$  値の決定には実際に得られている小数の水質データと河川の連続的な流量データが必要となるが、それらがあれば流域や水質項目を選ばず適用可能となり、汎用性もより一層高い手法となった。すなわち汎用的な負荷量の推定法を完成することができた。

### (4) 本研究課題の成果のまとめ

本研究により、定期調査をはじめとする既存の水質モニタリングデータを基に、河川の流出負荷量の不偏推定量と、その信頼区間を構成できるようになった。また一定積算流量毎にサンプリングすれば、多くの水質項目でより効率の良い推定が可能となることも示すことができた。大きな河川ではそのようなサンプリングは困難であるため、定期調査データから負荷推定量を計算するアプローチが有効となるであろう。基となる既存水質データの標本数が小さな場合、ここで開発した手法が不偏推定量を計算できないような場合もある点には注意が必要であり、そのような場合への緩和策が望まれよう。

本研究の成果は、我が国のみならず、いやむしろ農地などの面源からの水質汚濁負荷が閉鎖性水域に大きなダメージを与えている欧米や中国などで、より適当な水質汚濁対策のための基礎数値を再計算したり、その不確かさを推定するのに利用できる。この面での応用を期待して、研究代表者は研究成果を現在投稿しているところであり、掲載が報告に間に合わなかったのが悔やまれる。いずれにせよ、この河川の流出負荷量に対して、統計的にも数学的にも妥当な不偏推定法や区間推定法が提示されたのは初めてのことであり、論文査読者の対応を見ても、そのような問題自体の影響の大きさが非常に軽視されているのが現状である。この研究成果を契機に、そのような誤った楽観的に過ぎる認識を改め、科学的に適切な環境容量の解釈がなされるようになることを切に期待している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 9 件)

多田明夫・田中丸治哉，流量比例コンポジットサンプルは正しい流量荷重平均濃度を与えるか？あるいは、面源負荷量推定でこれまで我々は何を間違えていたのか？，平成 27 年度農業農村工学会大会講演会，2015

多田明夫・田中丸治哉，水質モデルの新規巻き直し；水質サンプリングと汚濁負荷推定法の見直し，平成 28 年度農業農村工学会大会講演会，2016

橋本航・多田明夫・田中丸治哉，LQ 式の回帰残差特性が流出負荷推定に与える影響，平成 28 年度農業農村工学会大会講演会，2016

多田明夫・田中丸治哉，流出負荷量の不偏推定法の一般化，平成 29 年度農業農村工学会大会講演会，2017

橋本航・多田明夫・田中丸治哉，時間に関する重み付き回帰による LQ 式を用いた流出負荷推定法の改良，平成 29 年度農業農村工学会大会講演会，2017

橋本航・多田明夫；田中丸治哉，LQ 式の経時変化を考慮した流出負荷量推定について，農業農村工学会京都支部第 74 回研究発表会，2017

多田明夫・田中丸治哉，Integration method for various water quality monitoring data

to estimate riverine constituent loads, AGU Fall meeting 2017, 2017

多田明夫・田中丸治哉，面源負荷量の和と差についての考察，平成 30 年度農業農村工学会大会講演会，2018

平井 淳志・多田明夫・田中丸治哉，流出負荷量推定のための現地モニタリングとその評価，平成 30 年度農業農村工学会大会講演会，2018

〔図書〕(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。