

氏 名	まえ だ しげ や 前 田 滋 哉
学位(専攻分野)	博 士 (農 学)
学位記番号	農 博 第 1251 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	農学研究科地域環境科学専攻
学位論文題目	Optimization of Wasteload Allocation for River Water Quality Management (河川水質管理のための汚濁負荷配分の最適化)
論文調査委員	(主 査) 教授 河地利彦 教授 青山 咸康 教授 高橋 強

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、長期的な河川水質管理に有効な汚濁負荷配分案を導くための最適化モデルについて論考したものである。現在、我が国をはじめ多くの国々で、水質環境基準や排水基準を設けて河川の水質改善の試みがなされているが、実際には十分な成果があがっていないのが現状である。効果的に河川の水質を改善し保全するためには、個々の河川水系ごとに、環境基準の達成を可能とする許容汚濁負荷量を推定し、これに基づいて排水規制を行うことが必要である。しかしながら、汚濁水を排出する側と河水を利用する側双方の相反する要望を勘案し、総合的・定量的に河川水質をコントロールする手法についての研究は近年になってようやく緒についたばかりである。加えて、河川の水利・水質環境の不確実性を考慮し、かつ、それに対して頑強である水質管理案を導く研究に至ってはほとんど見あたらないのが現状である。このようなことを背景として、本研究では、河川の複数の排水口のそれぞれにおいて許容される最大汚濁負荷量が求解でき合理的で説得力のある最適な汚濁負荷配分案(水質管理案)の導出を可能とする最適化手法について検討し、決定論的並びに確率論的な接近によって有用な線形計画モデルを考案している。

第 1 章は緒論であり、河川の水質管理を困難にしている要因について考察した上で最適化手法を用いた管理の重要性を指摘し、本論文の目的と意義を示している。

第 2 章では、河川における有機汚濁の代表的指標である生物化学的酸素要求量(BOD)と溶存酸素(DO)に関する輸送現象のモデル化手法、およびモデル中のパラメータの推定法についてこれまでの研究を論評し、最適化モデルにはより精緻な分布系水質モデルを組み込むべきことを主張している。

第 3 章では、まず、既存の河川水質管理モデルを整理している。次に、第 5 章から第 7 章で用いるロバスト最適化(Robust Optimization/RO)の概念を要約している。さらに、本研究で志向する多目的意思決定過程および最適化モデルについて述べ、モデルの開発・改良の指針を与えている。

第 4 章では、BOD と DO の一次元分布系輸送方程式、水質環境基準および排水基準を制約条件とし、河川ネットワーク全体に分布する排水口からの許容 BOD 総負荷量の最大化を目的関数とする決定論的な線形計画モデルを構築している。輸送方程式は水質濃度の急激な変動に対しても安定な解を保証する上流重みスキームを備えた有限要素法により離散化して、定式化プロセスの汎用性と最適解の安定性を向上させている。

第 5 章では、ロバスト最適化理論に依拠して前章で構築した最適化モデルを確率論的最適化モデル(RO モデル)に拡張し、河川の流れや水質環境の不確実な変動にも配慮した(頑強な)水質管理案の導出が可能となり一般性の高いモデルを開発している。不確実に変動する因子として水深、流量、水温を考え、これらの値の組み合わせをシナリオとする複数のシナリオを想定して、それぞれに離散的生起確率を与えることによって予測される未来の多様な状況を表現している。本 RO モデルは許容 BOD 総負荷量の期待値の最大化、各シナリオでの BOD 総負荷量のバラツキの最小化(解ロバストネスの最大化)、そして水質環境基準の未達成偏差の最小化(モデルロバストネスの最大化)を図る多目的最適化モデルである。仮

想的な河川システムにモデルの適用を行ってその有効性を検証するとともに、本モデルは従来の確率計画モデルを包含するより一般性の高いものであり、水質管理の代替案作成にきわめて有効であることを明らかにしている。

第6章では、前章のROモデルを不確実性に対してより頑強なものとするため、シナリオの構成要素に新たに河川上流端でのBODとDOの濃度を加えている。また、制約条件を再考して有意でない条件を排してモデルの実行可能性を高める工夫を行っている。さらに、ネットワーク河川にも適用できるような改良を図っている。

第7章では、多目的意思決定過程において効率的かつ合理的に代替案の作成を行うためには、ROモデルの求解法に、ラグランジェ関数法に代わる ε 制約法の適用が有用であることを指摘し、新たな ε -ROモデルを定式化している。 ε 制約法の導入により、検討価値のある水質管理案の作成効率が向上し、一般に最適化の後に行われる代替案のトレード・オフ分析に必要なトレード・オフ比が容易に得られることを示している。また、管理目的に新たに水質環境基準からの剰余偏差の最小化を加えれば、河川水質が全体として水質環境基準からの乖離がより小さい（BOD負荷量の負荷点ごとの格差が小さい）ものとなる汚濁負荷配分案が得られることを示している。

終章である第8章では、以上によって得られた知見を要約・整理するとともに、今後に残された課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

更新可能な淡水資源の枯渇が地球規模的な問題として深刻化する中、河川における水質の改善と保全はこの問題を克服し、持続可能な水利用を維持、増進する上でもっとも重要な課題となっている。このためには、河川管理者に対して、効果的で説得力のある汚濁負荷配分案を提示しうる水質管理モデル（意思決定支援モデル）の開発が緊要である。本論文は、有機汚濁に焦点をあてて、河川の水理・水質ダイナミクス、河川に課せられる水質環境基準を中心的な制約条件とする河川水質管理のための線形計画モデルについて考究し、BOD負荷配分問題に対する決定論的最適化モデル並びに確率論的最適化モデル（ロバスト最適化モデル）を提示したものであり、評価できる主要な点は以下のとおりである。

- (1)河川内部の水理・水質ダイナミクスを次元分布系モデルによって表現することにより、信頼性の高い最適解が得られる手法を提案した。さらに、これらの支配微分方程式の離散化には有限要素法を採用してモデルの汎用性を高めるとともに、特に水質ダイナミクスを表現する移流・分散方程式に対しては上流重みスキームを付加してモデルの安定性を向上させた。
- (2)水質ダイナミクスを最適化モデルの制約条件とし、その評価に必要な各種水理量は事前に行う水理シミュレーションによって推定する手法を採用して、最適化モデルの操作効率を飛躍的に向上させた。
- (3)決定論的最適化モデルに加えて、ロバスト最適化理論に依拠して、河川の水理・水質環境の不確実変動に対して解の感度がコントロールできる確率論的最適化モデルを開発した。すなわち、水深、流量、水温および河川上流端でのBOD・DO濃度の不確実な発生事象を離散的生起確率を与えたシナリオで表現し、同時に解の最適性と制約条件の緩和度を2種類のロバストネス（頑強性）として定義して、これらを主目的（河川全体に対する汚濁負荷総量の最大化）に重み付きで付加した多目的最適化問題を定式化した。その結果、ロバスト最適化モデルにおいて、目的の相対的優先度を表す重みを変えることにより、意思決定者の選好を反映させた多様な水質管理の代替案が得られることを明らかにした。
- (4)多目的意思決定過程における最適化モデルの機能を向上させるため、ロバスト最適化モデルの求解に ε 制約法を採用することを提案した。すなわち、合成目的関数中の重みを与件する代わりに主目的以外の目的値を直接指定する求解法を導入して、検討価値のある代替案が効率的に作成でき、かつ代替案を相互に比較・評価するために有用な各目的間のトレード・オフ比が容易に求められる最適化手法を案出した。
- (5)汚濁負荷量の負荷点ごとの格差を小さくして負荷の公平性を高めるためには、管理目的に水質環境基準からの剰余偏差の最小化を加えるべきことを指摘した。

以上のように、本論文は、河川の水質管理における意思決定問題について論じ、BOD負荷量の最適配分モデルとして、単一目的の決定論的最適化モデルとともに、河川の水理・水質の不確実な変動にも頑強で、競合する複数の管理目的が達成できる多目的の確率論的最適化モデルを新規に開発したものであり、水資源工学、環境システム工学の発展、並びに環境政策の実践面に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成14年2月18日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。