

区間計画法を用いた面源排出負荷量の多目的最適化
Multiobjective optimization of nonpoint source effluent load
using interval programming method

○ 前田 滋哉*・吉田 貢士*・黒田 久雄*

Shigeya Maeda*, Koshi Yoshida* and Hisao Kuroda*

1. はじめに 湖沼や河川のような水域の水質を保全するには、その流域内で発生する汚濁負荷の流出を管理することが重要である。この問題に対し、最適化手法の一つである数理計画法を用いて問題の構造を記述（最適化モデル化）・求解し、意思決定支援を試みる研究が行われている^[1,2,3]。このアプローチにおいて近年主に注目されているのは、汚濁負荷の管理に関わる不確実性を最適化モデル化の際にどのように定量化するかという点である。著者らは、流域内の面源セルに全窒素の許容排出負荷量を適切に配分する最適化モデル^[2]を開発してきた。そこでは目標のあいまいさをファジィ理論を用いて記述しているものの、河川流量や自浄作用といった物理化学現象の不確実変動を考慮できていなかった。そこで本研究ではこの点を改良しつつ、より統一かつ容易にモデルパラメータを決定するため、2段階区間計画法を用いたアプローチ^[1]による最適化モデルの開発を行う。そして、茨城県の清明川流域に適用し、モデル計算を行う。

2. 区間数を用いた管理目標の記述 対象流域を矩形セルに分割し、面源（水田、畑地、建物用地）セルでの全窒素の許容排出負荷量を求める問題を考える。管理目標のあいまいさ、自然現象の不確実性等が存在することを重視し、許容排出負荷量を区間数 (interval number)^[1]を用いて次のように表す。

$$L_{ji}^{\pm} \equiv [L_{ji}^{-}, L_{ji}^{+}], \quad j = p, u, c; \quad i = 1, \dots, I_j \quad (1)$$

ここで、下付添え字 i =セル番号、 j =面源の種類で、 p は水田、 u は畑地、 c は建物用地を表す。また、上付の $-$ は下限値、 $+$ は上限値、 \pm は区間数を表す。したがって、 L_{ji}^{\pm} =面源セル j_i からの区間数で表した排出負荷量 [$\text{kg} \cdot \text{day}^{-1}$]; L_{ji}^{-} , L_{ji}^{+} =面源セル j_i からの排出負荷量の下限値、上限値 [$\text{kg} \cdot \text{day}^{-1}$]; I_j = 面源タイプ j に属するセルの個数である。流域末端に流達する負荷量 T^{\pm} は L_{ji}^{\pm}

を用いた一次反応式で表せるとする。

流域規模で排出負荷管理を計画するため、以下の競合する2つの目標を考慮する。

1. 流域管理者の要求である、流域末端での水質環境の保全
2. 排出者の要求である、各面源での収益の最大化

これらの要求を定量的に記述するため、変曲点を区間数にした不確実メンバシップ関数 (imprecise membership function)^[1]を導入し、図1, 2のようにそれぞれ定義する。メンバシップ値 μ^{\pm} が1に近いほど要求の達成度が高いことを意味する。

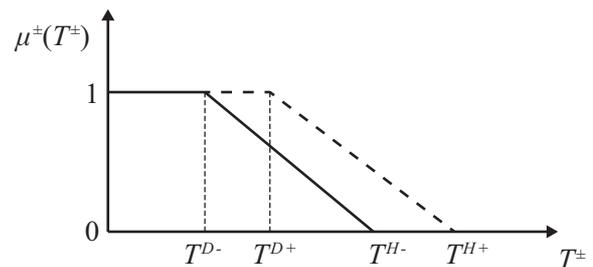


図1：流域管理者の要求を表す不確実メンバシップ関数

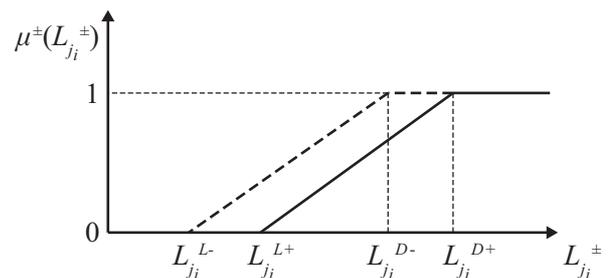


図2：排出者の要求を表す不確実メンバシップ関数

3. 最適化モデル 流域管理者と排出者の要求は競合するため、双方の要求を調和し、流域全体で統一した水質管理行動をとる必要がある。そこで、次の最適化問題を考える。

$$\text{Maximize } \xi^{\pm} \quad (2)$$

* 茨城大学農学部 *College of Agriculture, Ibaraki University
キーワード：面源，流域，水質保全，最適化，不確実性

subject to

1. 流域管理者の要求の達成度

$$\frac{T^{H\pm} - T^{\pm}}{T^{H\pm} - T^{D\pm}} \geq \xi^{\pm} \quad (3)$$

2. 排出者の要求の達成度

$$\frac{L_{ji}^{\pm} - L_{ji}^{L\pm}}{L_{ji}^{D\pm} - L_{ji}^{L\pm}} \geq \xi^{\pm}, \quad \forall i, j \quad (4)$$

3. 流域末端に流達する排出負荷量の上・下限制約

$$T^{D\pm} \leq T^{\pm} \leq T^{H\pm} \quad (5)$$

4. 面源セル j_i からの排出負荷量の上・下限制約

$$L_{ji}^{L\pm} \leq L_{ji}^{\pm} \leq L_{ji}^{D\pm}, \quad \forall i, j \quad (6)$$

5. 全体目的の達成度に関する上・下限制約

$$0 \leq \xi^{\pm} \leq 1 \quad (7)$$

$$\text{when } T^{\pm} = f(L_{ji}^{\pm}) \quad (8)$$

ここで $\xi^{\pm} \equiv [\xi^-, \xi^+] =$ 流域全体での目的達成度である。モデル中の変数は $L_{ji}^{\pm}, \xi^{\pm}, T^{\pm}$ のみであり、決定変数は L_{ji}^{\pm} である。メンバシップ関数を規定するパラメータ $T^{D\pm}, T^{H\pm}, L_{ji}^{L\pm}, L_{ji}^{D\pm}$ は、対象流域での施肥量、水質環境基準値等を勘案して設定する。また、セルからの負荷の流下距離は、GIS（地理情報システム）、DEM（数値標高モデル）等より推定する。最適化モデル [(2)-(8)] を最適解の区間数 L_{ji}^{\pm} の幅が最大になるように8個の線形計画問題に変換・求解・統合することにより、最終的な最適化モデルの解を得る。

4. 適用例 最適化モデル [(2)-(8)] を、霞ヶ浦流域内の小流域である清明川流域 (25.6km², 図3) に適用した。GISを用い、この流域を東西50m、南北60mの矩形セル（面積30a）に分割した。DEMと土地利用情報を重ね合わせて流路の推定を行い、本研究で管理対象とする水田セル1,208個、畑地セル1,719個、建物用地セル1,848個を特定した。この流域での土地利用の特徴として、河川上流部で宅地や市街地が広がる一方、中・下流部では谷津田が多いことが挙げられる。モデルパラメータの設定に際し、流下距離はDEM、河川流量は2013年の実測値、自浄係数は文献値^[4]を考慮した。流域末端で課す流達負荷量の上現値 $T^{D\pm}$ として、霞ヶ浦（西浦）での平成27年度全窒素濃度目標値1.1g/m³^[5]を当初用いて定め求解を試みたが、 $T^{H\pm}$ が比較的小さい場合は解が存在しなかった。そこで、解が得られるよう $T^{H\pm}$ の値を十分大きく定めたとこ、区間数で表される許容全窒素排出負荷量が得られた（図3）。このとき、

流域末端での負荷 $T^{\pm} = [2378, 3407](\text{kg} \cdot \text{day}^{-1})$,
全体での目的達成度 $\xi^{\pm} = [0.07644, 0.4646]$
となった。

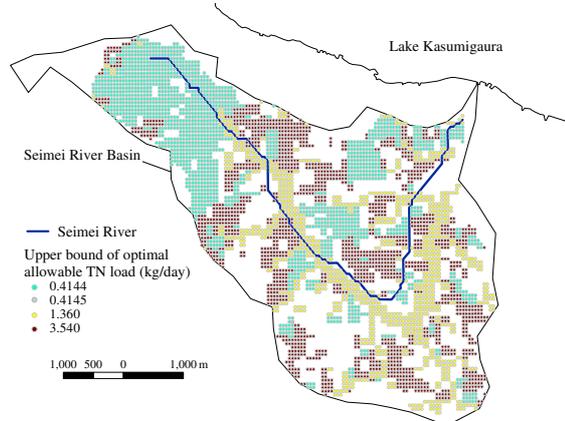


図3：清明川流域における水田，畑地，建物用地での許容全窒素排出負荷量の上限值 L_{ji}^{\pm}

5. おわりに 流域における面源排出負荷管理問題に対し、2段階区間計画法を用いて解く手法を提示した。霞ヶ浦流域の小流域である清明川流域に本手法を適用し、求解可能であることを確認した。これまでに得られた計算結果は、実際に設定されている西浦水質の管理目標の達成が困難であることを示唆している。しかし計算結果の信頼性を高めるため、今後、モデルパラメータ値の設定方法の改良、モデル式の修正等を適宜行う必要がある。

謝辞 本研究の一部は河川整備基金より平成25年度研究助成を受けて実施した。記して謝意を表します。

引用文献 [1] Karmakar, S, Mujumdar, PP. A two-phase grey fuzzy optimization approach for water quality management of a river system. Adv. Water Resour. 2007; 30: 1218-1235. [2] Maeda, S, Kawachi, T, Unami, K, Takeuchi, J, Izumi, T, Chono, S. Fuzzy optimization model for integrated management of total nitrogen loads from distributed point and nonpoint sources in watershed. Paddy Water Environ. 2009; 7: 163-175. [3] Li, T., Li, P., Chen, B., Hu, M., Zhang, X. Simulation-based inexact two-stage chance-constraint quadratic programming for sustainable water quality management under dual uncertainties. J. Water Resour. Plann. Manage. 2014; 140: 298-312. [4] Skop, E., Sørensen, P.B. GIS-based modelling of solute fluxes at the catchment scale: a case study of the agricultural contribution to the riverine nitrogen loading in the Vejle Fjord catchment, Denmark. Eco. Model. 1998; 106: 291-310. [5] 茨城県・栃木県・千葉県. 霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画（第6期）. 2012: 4-6.