

多目的最適化モデルを用いた河川水質管理における集団意思決定
Group Decision-making in River Water Quality Management
Using Multiobjective Optimization Model

○ 前田 滋哉 ・ 河地 利彦

○ Shigeya Maeda and Toshihiko Kawachi

1. はじめに これまで、著者らは河川水質を適切に管理するため、水質汚濁源に対して許容 COD (化学的酸素要求量) 負荷量を割り当てる多目的最適化モデル^{1),2)}を開発してきた。また、このモデルより得られる負荷量 (非劣解) から予想される河川水質を実際の河川の現状と比較することにより、河川水質管理現況を診断評価できることを例証してきた。^{1),2)}しかしながら、非劣解は多数存在するため、実際に政策として解を活用するには、それらの中から合理的に 1 個を選び出す方法について検討する必要がある。我が国では、意思決定は数人の責任者からなる集団によりなされ、その際に集団内部で各人の選好に相異がある場合には、コンセンサスが得られるよう調整者 (Coordinator) が尽力するのが一般的³⁾と考えられる。本報では河川水質管理における政策決定に利用できるよう、Watabe *et al.* (1992)³⁾の集団意思決定法と最適化モデルとを統合した方法を開発する。そして、滋賀県の野洲川に適用し、手法の有効性を検証する。

2. 意思決定過程 対象河川流域に存在する各点源 (工場、事業場) や小流域を単位としたそこからの COD 負荷量が制御可能な面源 (農地、市街地、ゴルフ場で構成され、森林は含まない) へ、負荷量を最適に配分する政策決定問題を考える。政策決定に責任を負う者 (意思決定者と呼ぶ) の集団による意思決定過程は、反復過程としてモデル化できる。すなわち、 ϵ -RO (Robust optimization⁴⁾) モデル (3 章参照) から求まる複数の非劣解を代替案とし、その中から最も好ましいもの (満足解) を多基準集団意思決定法 (4 章参照) により一つ選択する。次に、これに類似した非劣解を生成して同様の作業を繰り返し、最終的に代替案がすべてほぼ等しくなれば反復を終了、その時得られた満足解を政策として採用する。

3. 最適化モデル ϵ 制約法を援用した RO モデルである ϵ -RO モデルは、次のように表せる。

$$\text{Minimize } f_1(\cdot) \quad (1)$$

subject to

- (i) 河川の COD・DO 輸送式を有限要素法により離散化した式
- (ii) 点源での排水基準
- (iii) 河川の汚濁負荷点に課す緩和許容型水質環境基準
- (iv) 河川下流端における水質基準
- (v) 点源から排出される期待総 COD 負荷量に対する下限制約条件

$$\sum_s p_s \left(\sum_k q_k^p L_{ks}^p \right) \geq LO^{pl} \quad (2)$$

- (vi) 制御可能な面源排出負荷量の、現在値に対する比に関する上・下限制約

$$r^{npl} \leq \frac{\sum_s p_s q_{js}^{np} L_{js}^{np}}{LO_j^{np}} \leq r^{npu}, \quad \forall j \quad (3)$$

- (vii) 線形計画問題に変換するための補助的制約条件
- (viii) 変数の非負条件
- (ix) ϵ 制約条件

$$f_j(\cdot) \leq \epsilon_j, \quad j = 2, 3, 4 \quad (4)$$

ここで、

$$f_1(\cdot) = - \sum_s p_s x_s \quad (5)$$

$$f_2(\cdot) = \max_s \{ p_s | x_s - \sum_s p_s x_s | \} \quad (6)$$

$$f_3(\cdot) = \sum_s \sum_i p_s (U_{is}^{o+} + V_{is}^{o+}) \quad (7)$$

$$f_4(\cdot) = \sum_s \sum_i p_s (U_{is}^{o-} + V_{is}^{o-}) \quad (8)$$

$$x_s = \sum_k q_k^p L_{ks}^p + \sum_j q_{js}^{np} L_{js}^{np} \quad (9)$$

であり、上付文字の o, u, l はそれぞれ汚濁負荷点、上限値、下限値を表し、下付文字の s, k, j はそれぞれシナリオ、点源、小流域の番号を表す。また、 p_s = シナリオ s の生起確率、 x_s = シナリオ s での制御可能総 COD 負荷量 (g/s)、 q_k^p = 点源 k からの排水流量 (m^3/s)、 q_{js}^{np} = 小流域 j にある森林以外の面源からの排水流量 (m^3/s)、 L_{ks}^p = 点源 k からの排水中の COD 濃度 (mg/L)

(決定変数), L_{js}^{np} = 森林以外の面源からの排水中の COD 濃度 (mg/L) (決定変数), U_{is}^{o+} , V_{is}^{o+} = 水質基準からの COD・DO 濃度の逸脱量 (mg/L), U_{is}^{o-} , V_{is}^{o-} = 水質基準からの COD・DO 濃度の余剰量 (mg/L), LO^{pl} = 点源から排出される期待総 COD 負荷量の下限值, LO_j^{np} = 小流域 j からの現在の制御可能面源排出負荷量, r^{np} , r^{npu} = 求まる制御可能面源排出負荷量の, 現在値に対する比の下限值と上限値, そして ϵ_j = 目的関数 f_j の上限値を与えるパラメータである.

四つの目的関数はそれぞれ次のような意味を有している: f_1 =制御可能な期待総 COD 負荷量の負値, f_2 =制御可能な総 COD 負荷量の, 期待値からの最大期待絶対偏差, f_3 =汚濁負荷点での COD 濃度および DO 濃度の, 水質基準値からの逸脱量の期待総和, f_4 =汚濁負荷点での COD 濃度および DO 濃度の, 水質基準値からの余剰量の期待総和. 6 個のパラメータ LO^{pl} , r^{np} , r^{npu} , ϵ_j ($j = 2, 3, 4$) を指定して求解することにより, 多様な非劣解が得られる.

4. 多基準集団意思決定法 多基準集団意思決定法として Watabe *et al.* (1992)³⁾ の方法を採用する. まず, 次式で定義される代替案支持行列を求め.

$$S(i, k) = E(i, j)C(j, k) \quad (10)$$

ここで, i, j, k はそれぞれ代替案, 基準, 意思決定者を表し, $E(i, j)$ = 計画評価行列, その要素 $e(i, j)$ は基準 j に基づく代替案 i に対する評価を表す, $C(j, k)$ = 個別基準優先行列, その要素 $c(j, k)$ は基準 j が意思決定者 k にとってどれくらい重要か表す, $S(i, k)$ = 代替案支持行列, その要素 $s(i, k)$ は意思決定者 k が代替案 i を支持する度合い (値が大きいほど評価高) を表す. 行列 E で採用される評価基準は関連分野の専門家やモデル解析者などにより決定され, その要素の値は, ϵ -RO モデルの解より計算される. また, 行列 C は, 河川管理者や各種団体代表者等の意思決定者毎に, 各基準に対する選好に比例して, 総和が 1 となるような重みを付与することにより決定される.

意思決定者集団の満足解選択法は色々提案されているが, 例えば, 行列 S の行の要素の和が最大となる案を満足解として採用することが考えられる. その際, 選ばれた案を最良と考えない意思決定者がいる場合は, 行列 C の必要修正量を求め, それに基づき調整者がその意思決定者に妥協を促し, コンセンサスが得られるよう

にする. また, 集団による満足解の決定に対して各人の影響力に差がある場合は, 個別影響力ベクトル $I(k)$ を定義し, ベクトル

$$SI(i) = S(i, k)I(k) \quad (11)$$

を求める. そして, ベクトル SI の各成分の内最大のものに対応する代替案が, 意思決定者集団によりひとまず決定される満足解となる.

5. 計算例 滋賀県の野洲川下流部 (18.6km) における河川水質管理問題に本手法を適用する. 5 人の意思決定者を仮定し, 行列 C やベクトル I を決める. また, 行列 E は ϵ -RO モデルの 7 個の非劣解を基に作成する. 代替案の評価基準として, 次の 7 個が用いられると仮定する. すなわち, C1: 河川平均 COD 濃度, C2: 河川下流端 COD 濃度, C3: 河川への点源からの期待総 COD 負荷量, C4: 河川への森林を除く面源からの期待総 COD 負荷量, C5: 小流域末端部へ割り当てられる森林以外の面源からの期待 COD 負荷量の, 現在値に対する比の内の最小値, C6: 小流域末端部へ割り当てられる森林以外の面源からの期待 COD 負荷量の, 現在値に対する比の内の最大値, C7: f_2 . 式 (10), (11) を計算し, 集団の満足解を決定するプロセスを繰り返すと, 最終的に政策として採用される, 点源 74 箇所および小流域末端部 9 箇所への COD 負荷量の配分案が得られる. 結果の詳細は講演会場にて示す.

6. おわりに 河川水質管理において, 意思決定者と代替案の評価基準がそれぞれ複数存在する場合の政策決定支援手法を提示した. 最適化モデルを代替案作成ツールとし, 多基準集団意思決定法を用いて複数の代替案の中から意思決定者集団が満足解を選ぶという作業を繰り返すことにより, 意思決定の合理性が高まると考えられる.

引用文献 1) Kawachi, T. and Maeda, S.: Diagnostic appraisal of water quality and pollution control realities in Yasu River using GIS-aided epsilon robust optimization model, *Proc. Jpn. Acad.*, Ser. B, 80(8), pp.399-405, 2004. 2) Maeda, S. and Kawachi, T.: Evaluation of river water quality management level based on COD-loads optimally allocated to point and nonpoint sources, *Proceedings of XXXI IAHR Congress*, 2005. (contributed) 3) Watabe, K., Holsapple, C.W. and Whinston, A.B.: Coordinator support in a *nemawashi* decision process, *Decision Support Systems*, 8, pp.85-98, 1992. 4) Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A.: Robust optimization of large-scale systems, *Operations Research*, 43(2), pp.264-281, 1995.