

公平性を考慮した野洲川における COD 負荷量の最適配分 Optimum Allocation of COD Loading into Yasu River with Equity Measure

○ 前田 滋哉 ・ 河地 利彦

○ Shigeya Maeda and Toshihiko Kawachi

1. はじめに 著者らは、河川水質の長期的管理問題において、農地、市街地、森林といった面源からの制御困難な負荷を考慮した上で、点源からの許容 COD 負荷量を河川の各負荷点に配分する確率論的最適化モデルを構築してきた。¹⁾ これを滋賀県野洲川に適用したところ、実際の政策に比して、河川全体へより多くの負荷を許容し、かつ、河川水質が平均的に良好になるような水質管理案を示すことができた。²⁾ しかしながら、それらは許容負荷量の場所的変動が大きい(公平性が低い)ため、従来の目的を追求すると同時に公平性も視野に入れた代替案を提示できるよう、モデルを改良することが望ましい。ここでは公平性を表す目的関数と、各負荷点への期待負荷量に対する上・下限制約を加えた最適化モデルを開発して野洲川に適用し、その有効性を検証する。

2. 解析対象 野洲川下流部の横田橋-服部大橋間 18.6km を河川水質管理を考える区間とする (Fig. 1)。石部頭首工においては流れが常流から射流に急変するため、解析区間を横田橋から頭首工の直上流部までの Reach 1 と、頭首工直下流部から服部大橋までの Reach 2 に一旦分割し、それぞれの河区で定常次元の不等流れ解析を行う。その後、河川全体に関して許容 COD 負荷量の最適配分を考える。

解析区間に対応する流域 (89.6km²) は、地形図、数値標高モデル (DEM) および ArcView GIS を用いて得られた 9 個の小流域に分割できる。各小流域の末端部は、GIS を利用して推定される流路網と野洲川本川が交わる部分と考え、Fig. 1 に示す位置で小流域内の面源からの排水 ($q_j^{np}, j = 1, \dots, 9$) が流達すると仮定する。一方、点源負荷については事業所 74 箇所を考え、それらが支川に合流して、最終的に 14 の排水 ($q_j^p, j = 1, \dots, 14$) が生じていると考える。また、5 箇所からの取水も考慮する (Fig. 1 の点線矢印)。

3. COD・DO 輸送式 河川における COD と DO の濃度は次式に支配されると仮定する。

$$Q \frac{dL}{dx} - \frac{d}{dx} \left(AD_x \frac{dL}{dx} \right) + AK_1 L + (\bar{q}^p + \bar{q}^{np} - \bar{q}^m) L - \bar{q}^p L^p = \bar{q}^{np} L^{np}, \quad (1)$$

$$Q \frac{dC}{dx} - \frac{d}{dx} \left(AD_x \frac{dC}{dx} \right) + AK_1 L - AK_2 (C_S - C) + (\bar{q}^p + \bar{q}^{np} - \bar{q}^m) C = 0 \quad (2)$$

ここに、 x = 流下距離 (m), L, C = 河川水の COD・DO 濃度 (mg/L), A = 通水断面積 (m²), Q = 河川流量 (m³/s), \bar{q}^p, \bar{q}^{np} = 点源、面源からの排水の単位幅横流入流量 (m²/s), \bar{q}^m = 単位幅あたりの河川からの引き抜き流量 (m²/s), L^p, L^{np} = 点源、面源から流達した排水の COD 濃度 (mg/L), D_x = 縦方向分散係数 (m²/s), K_1 = 脱酸素係数 (1/s), K_2 = 再曝気係数 (1/s), そして C_S = 飽和溶存酸素濃度 (mg/L) である。

4. 最適化モデル 河川の水質管理期間を一年とし、各月に対応する 12 個のシナリオを想定する。ここで、ロバスト最適化 (RO) の枠組³⁾ と ϵ 制約法を用いて定式化された ϵ -RO モデル²⁾ を、各負荷点での許容 COD 負荷量に場所的な差が極端に出ないように改良する。5 個の目的のうち、主目的 (目的関数 f_1) は点源からの総 COD 許容負荷量の期待値を最大化することである。他の 4 個の目的 (目的関数 f_2, f_3, f_4, f_5) はそれぞれ、総 COD 負荷量のシナリオ間のバラツキの最小化、水質基準の未達成量の最小化、水質が良好なために生ずる水質基準値までの偏差の最小化、そして負荷点への負荷量のレンジ (最大値 - 最小値) の最小化 (公平性の最大化) である。目的 f_2, f_3, f_4, f_5 は ϵ 制約条件として表現され、その達成度はパラメータ $\epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5$ の値を用いて指定する。他の制約条件は、COD・DO 輸送式 (1),(2) を有限要素法を用いて離散化した式、点源からの排水における COD の濃度と量についての基準、河川水の COD・DO 濃度についての水質環境基準、そして変数の非負条件である。

制約条件はシナリオごとに作成する必要があるが、月変化するものはCOD・DO 輸送式 (1),(2)のみである。式中、流量 Q は連続式を用いて、水深 h はベルヌーイの式を用いた試算式により、節点ごとに算出する。 D_x, C_S は実験式を用いて、求めた水理変数と水温データから推定する。 K_1, K_2 については、有限要素法を用いた COD・DO 輸送の数値シミュレーションを行い、計算値を石部および服部大橋での実測値と比較し、Reach 1 と 2 に対して試行錯誤的に同定する。シミュレーションの際、小流域からの COD 負荷量は原単位法により推定する。

5. 結果と考察 新たに提案する最適化モデルと、公平性の尺度 f_5 とそれに関連する制約条件を考慮していない改良前の最適化モデルをそれぞれモデル I, II とする。モデル I の解 A, B とモデル II の解 C, そして現在の野洲川における負荷政策を比較する。パラメータ値のうち、 $\epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ はすべての解で同一にし、 ϵ_5 については解 A で 2.9g/s, 解 B で 3.8g/s と設定する。また、解 A, B において、期待 COD 負荷量の下限値を、実際の最小負荷量と同じ 0.0013g/s とする。

河川における期待 COD 濃度の分布を Fig. 2 に示す。琵琶湖における COD に関する水質基準 (1mg/L) を野洲川において代用すると、逸脱量は節点平均で現在 1.729mg/L であるのに対し、解 A, B, C ではそれぞれ 1.602, 1.623, 1.673mg/L とすべて低く抑えられている。また Table 1 に示すように、最適化モデルから得られた解は総許容 COD 負荷量が実際より多く、有利である。公平性に関しては実際の政策に及ばないものの、モデル I の解は ϵ_5 を小さく設定することにより、モデル II の解 C ($f_5 = 5.6\text{g/s}$) より公平性が高くなっている (解 A, B で $f_5 = 2.9, 3.8\text{g/s}$) ことが確認できる。

6. おわりに 公平性を考慮した解が得られるよう、従来の最適化モデルに目的関数と制約条件を追加し、野洲川にそのモデルを適用した。そして、得られた解を実際の負荷政策および改良前のモデルの解と比較した。その結果、新たに提案したモデル (モデル I) はさらに検討価値のある水質管理案を意思決定者に提供可能であることを示せた。

引用文献 1) 前田滋哉・河地利彦: 面源負荷を考慮した河川における汚濁負荷の最適配分, 第 59 回農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集, pp.110-111, 2002. 2) Maeda, S. and Kawachi, T.: Integrated

management of river water quality under uncertainty using optimization model, Proc. 30th IAHR Cong., 2003. (submitted) 3) Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A.: Robust optimization of large-scale systems, Operations Research, 43(2), pp.264-281, 1995.

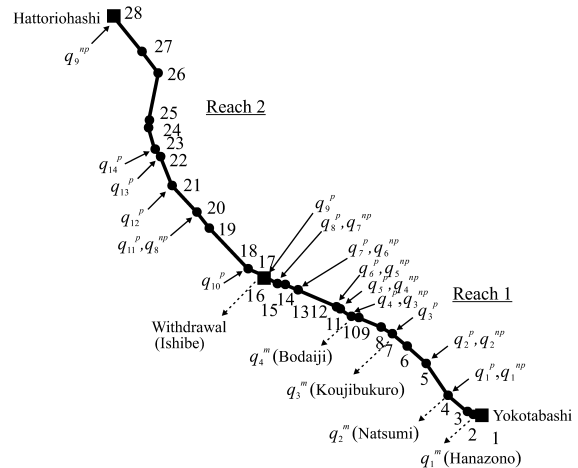


Fig. 1. Inflows and outflows in control section of Yasu River

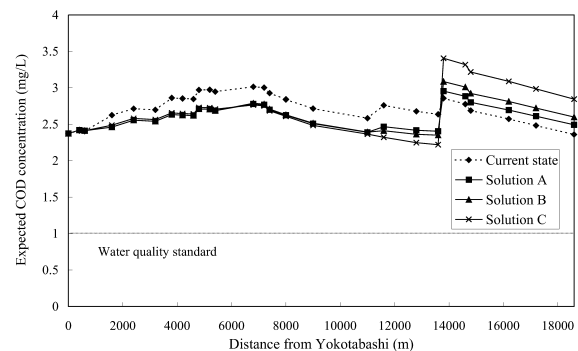


Fig. 2. Expected COD concentration profiles

Table 1. Comparison of current COD loadings with noninferior solutions

Node	Current (g/s)	A (g/s)	B (g/s)	C (g/s)
4	1.0086	0.0013	0.0013	0.1096
5	0.0376	0.0013	0.0013	0.0000
7	0.4990	0.0013	0.0013	0.0000
10	0.2722	0.0013	0.0013	0.0000
11	0.0488	0.0013	0.0013	0.0000
12	0.0013	0.0013	0.0013	0.0008
13	0.5272	0.3821	0.4259	0.2294
15	0.0149	0.0174	0.0233	0.0116
16	0.0148	0.0267	0.0146	0.0132
18	0.1317	0.1721	0.1436	0.0840
20	0.9872	1.0519	0.6860	0.0249
21	0.0473	0.2637	0.2528	0.0632
22	0.0101	0.1218	0.1218	0.0412
23	1.0933	2.9013	3.8013	5.6085
Total	4.6940	4.9448	5.4770	6.1860