

農業集水域における耕区への許容排出全窒素負荷量の最適配分
Optimal Allocation of Allowable Discharged Total Nitrogen Loads to
Field Lots in Agricultural Watershed

○ 吉川 和樹 · 前田 滋哉 · 河地 利彦

○ Kazuki Yoshikawa and Shigeya Maeda and Toshihiko Kawachi

1. はじめに

近年、面源（水田、畑地、市街地など）からの過剰な窒素流出による河川や湖沼の水質悪化が大きな問題となっている。こうした面源からの窒素流出を効果的に管理するには、流域レベルで環境と経済の両面に配慮した排出負荷管理モデルを開発する必要があると考えられる。このような観点から、著者ら¹⁾はGIS(地理情報システム)を援用して河川流域を統一規格の格子に区切り、そこへの全窒素(T-N)の最適配分量を計算する多目的線形計画モデルを提案している。しかし、より詳細に農業集水域での排出負荷管理を考える場合、面源をより小さな単位で捉える必要がある。そこで、本研究では、水田と畑地の耕区を一つの汚染源と考え、土地管理単位(Land Management Unit, LMU)と名づけて最適化モデルを定式化し、LMU毎の許容排出全窒素負荷量を計算する。

2. 窒素輸送モデル

窒素は「直接流出」と「基底流出」により面源から流出すると仮定する。各流出の発生比率は、面源表層の土性にのみ依存するとする。LMUの排出窒素は、直接流出では接する排水路を通り河川へ、基底流出では飽和層まで浸透後標高差に基づきその層を通り河川へ輸送される。その後窒素は、河川を流れ、集水域の末端に至る。窒素は流下する際に自然浄化され、その窒素負荷の減少量は輸送距離に比例すると仮定する。

3. 最適化モデル

本研究では面源として水田と畑地のみを考えている。そのため、最適化モデルで設定する目的として、「面源からの総排出 T-N 負荷量の最大化」と「米収の最大化」の2つを考える。後者を ϵ -制約法²⁾により制約条件に変え、次の線形計画モデル(最適化モデル)を定式化する。

$$\text{Maximize } \sum_k \sum_{i=1}^{I_k} A_{k_i} (L_{k_i}^d + L_{k_i}^b) \quad (1)$$

subject to

- (i) 農業集水域末端での流達 T-N 負荷量の上限制約

$$\sum_k \sum_{i=1}^{I_k} \left\{ e^{-\left(\frac{\lambda^d}{Q_{k_i}^d} x_{k_i}^d + \frac{\lambda^w}{Q^w} x_{k_i}^{wd}\right)} A_{k_i} L_{k_i}^d + e^{-\left(\lambda^b x_{k_i}^b + \frac{\lambda^w}{Q^w} x_{k_i}^{wb}\right)} A_{k_i} L_{k_i}^b \right\} \leq \bar{L} \quad (2)$$

- (ii) 土性毎の直接流出と基底流出の関係

$$L_{k_i}^b = r_s L_{k_i}^d, \quad \forall i \text{ 砂質土壌の場合} \quad (3)$$

$$L_{k_i}^b = r_l L_{k_i}^d, \quad \forall i \text{ 粘土質土壌の場合} \quad (4)$$

- (iii) 最大米収時の T-N 排出負荷量と計算値の関係

$$L_{p_i}^b + L_{p_i}^d - L_{p_i}^{opt} = u_{p_i}^+ - u_{p_i}^-, \quad \forall i \quad (5)$$

- (iv) $u_{p_i}^+$ と $u_{p_i}^-$ の上限制約

$$u_{p_i}^+ \leq \overline{u_{p_i}^+}, \quad u_{p_i}^- \leq \overline{u_{p_i}^-}, \quad \forall i \quad (6)$$

- (v) 畑地からの T-N 流出量の上・下限制約

$$L_{u_i} \leq L_{u_i}^d + L_{u_i}^b \leq \overline{L_{u_i}}, \quad \forall i \quad (7)$$

- (vi) 変数の非負条件

$$L_{k_i}^d, L_{k_i}^b, u_{p_i}^+, u_{p_i}^- \geq 0, \quad \forall i \quad (8)$$

- (vii) ϵ -制約条件

$$\sum_{i=1}^I (u_{p_i}^+ + u_{p_i}^-) \leq \epsilon_2 \quad (9)$$

ここで、 k =LMU が p (水田) もしくは u (畑地)であることを示す添字、 i =LMU が k の時の LMU の番号 ($i = 1, 2, \dots, I_k$), I_k =LMU が k の時の LMU の総数、 $L_{k_i}^d$ =LMU k_i から直接流出として排出される T-N 負荷量 (g/ha/day), $L_{k_i}^b$ =LMU k_i から基底流出として排出される T-N 負荷量 (g/ha/day), A_{k_i} =LMU k_i の面積 (ha), λ^d =排水路における自浄係数 (m^2/day), λ^b =土壌中の自浄係数 (1/m), λ^w =河川における自浄係数 (m^2/day), $Q_{k_i}^d$ =LMU k_i の排水路の流量 (m^3/day), Q^w =河川流量 (m^3/day),

$x_{k_i}^d$ = LMU k_i から河川までの排水路長 (m), $x_{k_i}^{wd}$ = 排水路接続部から末端までの河川長 (m), $x_{k_i}^b$ = LMU k_i から河川までの基底流出の流下距離 (m), $x_{k_i}^{wb}$ = 基底流出の流入点から末端までの河川長 (m), \bar{L} = 末端部における流達 T-N 負荷量の上限值 (g/day), r_s, r_l = LMU の土性毎の直接流出と基底流出による T-N 流出の発生比, $L_{p_i}^{opt}$ = 最大米収時に水田から排出される T-N 負荷量 (g/ha/day), $u_{p_i}^+, u_{p_i}^- = L_{p_i}^{opt}$ からの偏差の正負の許容幅 (g/ha/day), $u_{p_i}^+, u_{p_i}^- = u_{p_i}^+$ と $u_{p_i}^-$ の上限値, L_{u_i}, \bar{L}_{u_i} = 畑地から排出される T-N 負荷量の下限・上限値, そして ϵ_2 = パラメータである。

4. 水路における自浄係数の推定

水路における自浄係数 λ^d は, Ha *et al.*(1998)⁵⁾ と同様に以下の式を用いて推定する。

$$L_a = \sum_{j=1}^J e^{-\frac{\lambda^d x_j^d}{Q_j^d}} A_j L_j^d, \quad e = \frac{|L_a - L_o|}{L_o} \quad (10)$$

ここで, j = 一本の排水路に属する LMU の番号 ($j = 1, 2, \dots, J$), L_a, L_o = 排水路と河川との合流部における T-N 負荷量の計算値と実測値, そして e = 誤差率である。 e が十分小さくなるような λ^d を求める。

5. 適用例

滋賀県北西部 I 町の農業集水域 (図 1) に上述のモデルを適用した。

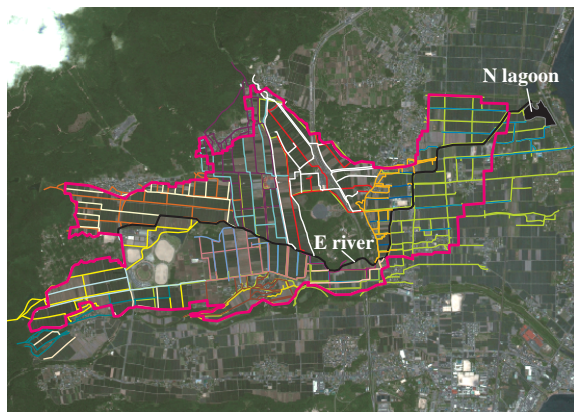


図 1 適用地と用排水路網

Figure 1: Study area, and irrigation and drainage canals

この地域の LMU は全部で 1,402 個あり, その内水田は 1059 個, 畑地は 343 個である。 E 川が N 内湖に流入する箇所直上流点を末端部とし, この地点に流達する T-N 負荷量を制限する。 直接流出もしくは基底流出が E 川に流入しない LMU は計 334 個存在する。 パラメー

ターである $x_{k_i}^d, x_{k_i}^{wd}, x_{k_i}^b, x_{k_i}^{wb}, A_{k_i}$ は, GIS を用いて標高データと衛星画像 ((株)NTT データ BASEIMAGE) より求めた。 また λ^b, λ^w は Ha *et al.*(1998)⁵⁾ を基に, $Q_{k_i}^d, Q^w, \bar{L}$ は 2007 年 5 月 8 日の調査結果を基に計算した。 λ^d は, 実際の元肥量から計算した直接流出として流出する T-N 負荷量と, 2007 年 5 月 8 日の実測結果から計算した排水路流入点での T-N 負荷量を基に, 式 (10) より計算した。 また, $L_{p_i}^{opt}, u_{p_i}^+, u_{p_i}^-, L_{u_i}, \bar{L}_{u_i}$ は滋賀県でのデータ^{3), 4)} を用いて設定した。 本研究で使用した主なパラメータの値は, $\bar{L} = 26,913.90$ (g/day), $L_{p_i}^{opt} = 140.2$ (g/ha/day), $\lambda^d = 0.612$ (m²/day), $\lambda^b = 0.00085$ (1/m), $\lambda^w = 0.48$ (m²/day), $L_{u_i} = 50.41$ (g/ha/day), そして $\bar{L}_{u_i} = 252.06$ (g/ha/day) である。 $\epsilon_2 = 1,200$ を与えたときに最適解は存在し, この時の各 LMU での排出 T-N 負荷量は図 2 のようになった。

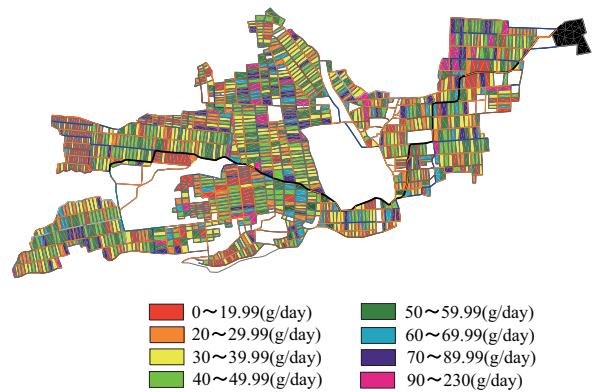


図 2 各耕区からの最適排出 T-N 負荷量

Figure 2: Optimal discharged T-N load from each field lot

6. おわりに

水域の水環境保全のため, 自浄作用を考慮に入れ, 水田と畑地一筆毎の許容排出全窒素負荷量を算出する最適化モデルを開発した。 今後は, より現実に則した問題を考えるため, 最適化モデルで住宅地や点源からの排出負荷を考慮することが必要である。

引用文献

- 1) Maeda, S., Kawachi, T. and Zhang, Q. (2006): Grid-based Optimization Model for Allocating Allowable Discharged Total Nitrogen to Point and Nonpoint Sources in Watershed, *Trans. of JSIDRE*, 242, pp.151-157.
- 2) 坂和正敏 (1996): 非線形システムの最適化, 森北出版, pp.120-122.
- 3) 農林水産省 (2007): 都道府県施肥基準. <http://www.maff.go.jp/sehikijun/top.html>
- 4) 宗宮功 (2000): 琵琶湖-その環境と水質形成-, 技法堂出版, pp.149-172.
- 5) Ha, S.R., Jung, D.I. and Yoon, C.H. (1998): A Renovated Model for Spatial Analysis of Pollutant Runoff Loads in Agricultural Watershed, *Wat. Sci. Tech.*, 38(10), pp.207-214.