

日本における農村流域の水質モデルの開発状況 Current situation and issues of agricultural watershed modelling in Japan

○白谷栄作*・濱田康治*・人見忠良*
Eisaku SHIRATANI, Koji HAMADA and Tadayoshi HITOMI

1. 農地排出負荷の特徴

河川・湖沼からの取水量の約 65%を農業が利用している。このため、農業を通じた水及び物質の流れは流域の水環境全に与える影響が大きい。

農地から排出される負荷は、温度、土壌水分、土性等の自然条件の影響のみならず、栽培・肥培管理及び水管理の影響を強く受ける。人為的な行為はコントロール可能なものである反面、農家個々人の行動を把握することは実際には出来ない。また、農地からの負荷は地表だけでなく特に畑地では地下経由で排出され、しかも土層中の水移動は選択性があり、排水中の負荷を捉えることは出来ない。更に、排出負荷が水系へ流出する過程が複雑で、排出行為の結果が直ぐに水環境へ反映されにくいいため、流域の調査結果から農地からの負荷を分離定量化することにも限界がある。土壌との反応の大きいリンや有機物については、特に難しい。農地排出負荷をモデル化するためには、負荷排出を精度良く把握するとともに影響因子を抽出し併せて把握する必要があるが、農地からの排出負荷を定量的に把握すること自体が困難なものでもある。

2. 流域の負荷管理のためのモデル

モデルは大きくは、現象の理解と対策の検討に利用される。モデルは、自然現象をそのまま忠実に再現することは出来ないため、現象の主な感度の高いプロセスを抽出し構成することになるが、そのためにはモデルの利用目的の明確化が必要となる。流域管理では、流域の水と負荷を制御するシナリオ分析能力や合意形成のための現象の表現能力がモデルに求められる。農地負荷の管理に関するシナリオには、Table 1に示すように減肥、肥料成分や施肥方法の変更、栽培作物や農作業方法の変更という圃場レベルの対策の他循環灌漑や反復利用、生活系排水の農業利用などが考えられ、農地排出負荷モデルは、これらの作用が関数化、補助関数化されていることが必要となる。

(1) 流域の農地負荷の診断モデル

流域の排出負荷の推定は、現在は原単位法で行う場合が多い。しかし、農地排水は、流下過程で再利用され、一筆の排出負荷の積算が水系へ寄与する負荷となるとは言えないことから、農業対策のための診断手法としては適切とは言えない。この点、田淵・黒田(1991)の提案したフローダイヤグラムは、農業地帯の灌漑期、非灌漑期又は通年の負荷の流れを簡略に模式化したもので、流域における農地負荷の寄与を診断する手法として優れたものである。近年では、農地その他土地利用における水質反応に関する知見の集積と GIS の利用によって高度な地形連鎖を表現できるフローダイヤグラム(松森, 2005)の作成が可能になった。

(2) 農地の負荷排出モデル

水田の負荷排出に関しては、田淵ら(1996)によって、田面水中の窒素濃度の減少は単純な 1 次反応式で表現できることが示されている。いくつかの調査結果に基づき 1 次反応式の数値定数を整理すると、水田や湿地の窒素濃度の減少は、底質表面の脱窒と水中の藻類による吸収の作用が、ほぼ同程度寄与していることになる(Shiratani *et al.*, 2004)。

水田は、尿素、アンモニア及び硝酸などいくつかの形態の窒素で施肥されるため、より詳細な肥培管理に対応できるように田面水中の各態窒素の動態をモデル化したもの(例えば、森, 1990; Yoshinaga *et al.*, 2004)も開発されている。しかし、代掻き・田植え時の施肥と底質の巻き上げによる田面水の濃度上昇には物理的なモデルが適用されていないなど、改良の余地がある。代掻き時の土壌流出に関わる有機

Table 1 農業系排出負荷の管理

肥培管理の変更	減肥, 有機質肥料・肥効調節型肥料の利用, 分施
水管理の変更	浅水代掻き, 紙マルチ, 畑地灌漑, 地下灌漑, 循環灌漑, 反復灌漑
土地利用の変更	大区画化, 転換畑, ピオトーブ水田
排水浄化	沈砂池, 草生帯, 水路清機

* 農村工学研究所 National Institute for Rural Engineering

キーワード: 流域管理, GIS, 農地

物やリンのモデル開発は、森ら（1991a；1991b）のものがある以外は見られない。

畑地では、水田に対し栽培作物及び施肥形態並びに土壌条件が多様であるが、溶脱負荷のモデルは、土壌中の各形態の有機物及び無機物並びに作物の量を状態量としてそれらの反応をモデル化し、水移動によって空間移動する構成のものが一般的である（例えば、木方・イスラム、1995；白谷ら、1996）。圃場レベルで、土層中の水移動を matrix flow と捉えることが可能な場合は水分張力勾配に基づきモデル化するが、低平地の汎用水田等のように亀裂の発達した圃場では、横置きタンクモデルで亀裂を考慮したモデルが使われている（井上、1985；Shiratani *et al.*, 2005）。

また、土壌浸食と共に排出される SS 等の負荷は、経験式に基づく土壌浸食モデル（Mihara *et al.*, 2005）や物理モデルが開発されている。

(3) 農村流域のモデル

農業用水は、流域レベルから圃場レベルまで堰やポンプで人為的にコントロールされるため、水田地帯をモデル上に表現するためには、空間に用排水施設を配置することが必要となる。しかし、圃場レベルでは、その配置や用排水行為をモデル上で再現するには限界があるため、一定のまとまった空間を単位にし、用排水計画に沿った水管理が為されるという仮定の下にそれを模擬したものでモデル化せざるを得ない。土地利用別タンクモデル（戸原ら、1983；中曽根ら、2000）は定点の流量及び負荷量を推定することができ、分布定数型モデルは任意の地点の水質を計算する場合に使われる。滝本ら（2010）は、タンクモデルで推定した流量から原単位法又は L-Q 式によって負荷量を推定する手法によって流域の用水反復利用による負荷削減効果を評価している。また、宗像ら（2005）は、愛知県油が淵流域を約 100 メッシュで空間分割したうえで、農業用排水路をラインデータで配置するとともに、水田では稲作暦に従った水管理を想定したモデル（Shiratani, *et al.*, 2004）を組み込んだ流域モデルを開発している。このことで、循環灌漑や反復利用、都市排水の農業への再利用、節水灌漑や浅水灌漑その他の流域レベルの水管理の表現を可能にしている。

一方、畑の多い中山間農業地帯では、排出された負荷が地下経由で水系（河川や地下水）へ到達するものが多いため、負荷排出と流出に数年～数十年のタイムラグがある（Kubota, 2006）。このため、水質濃度の変化程度のみならず変化の時期が重要で、久保田ら（2006）が恋瀬川流域で開発した三次元分布型モデルは、水・物質移動に物理法則と反応則をあてはめ構築したもので、畑地の施肥形態に関する対策について数十年間のタイムラグの評価を可能としている。Kato（2005）は、土地利用別水質タンクモデルで 40 年間の畑地や畜産排泄物対策の効果を評価し、またこの分布型モデルも開発されている（加藤ら、2005）。

3. 今後のモデル開発の課題

流域管理では、流域内の負荷量とその内訳から流域全体を捉え、対策を取るべき負荷源を明らかにしたうえでその部分を細かく分析し、流域として評価するという手順をとる。そこではモデルの活用が有効である。流域の水・物質移動を一つのモデルで表現したものを流域管理の診断～対策検討～評価に活用することは未だに制限される。つまり、農業流域は不均質で想定される対策も多様で、これら全ての現象を統合した巨大なモデルは用途に限られる。現時点では数レベルの数種類のモデルを体系的に統合して利用することが実用的と考えられる。

しかし、今後は計算に係るハード機能と GIS 等のソフト機能の発展に伴い、流域レベルのより精緻な水・物質循環を統合したモデルが構築され、診断～対策～評価を一貫して行うシステムの開発が進むと思われる。特に、汎用的な利用のためには、物理的な統合モデルの開発が期待されるが、一方で複雑化するモデルに対応した十分な検証データと補助関数データの取得が不可欠になってくる。

（紙面の都合上参考文献は省略）

Table 2 農村流域モデルの開発例

開発者	対象流域	モデルタイプ	内容	項目
戸原ら (1983)	遠賀川支流域 (18 km ²)	水質タンクモデル		COD
中曽根ら (2000)	茨城県小流域 (2.05 km ²)	土地利用別水質タンクモデル	水田、畑、森林及び河道	NO ₃ -N, EC
加藤ら (2003)	山田川 (19.5 km ²)	土地利用別タンクモデル	水田、畑、森林及び宅地	TN
瀧本ら (2010)	河北潟流域 (238 km ²)		水田、畑、山地、市街地	TN, TP
宗像ら (2006)	油が淵流域	メッシュ 2 段タンクモデルと水路モデルの重合せ	メッシュ	土地を約 100 m, TN, TP, COD
久保田ら (2006)	茨城県恋瀬川流域 (237 km ²)	3 次元分布定数型モデル	約 100 万グリッド, 22 層	TN