

## 農地排出負荷削減のモデル分析

白谷栄作\*・吉永育生\*・人見忠良\*・三浦 麻\*

## Model Analysis for Reduction of Effluent Load from Cultivated Lands

Eisaku SHIRATANI\*, Ikuo YOSHINAGA\*, Tadayoshi HITOMI\* and Asa MIURA\*

\* National Institute for Rural Engineering, Tsukuba Science City 305-8609, Japan

## Abstract

We developed a numerical model to simulate N flow in an agricultural paddy field and upland field area and analysed scenarios for recycling the agricultural runoff, including field drainage, from an agricultural area with an irrigation/drainage system. In it, we considered N removal in paddy fields, a regulating reservoir, and canals. The results of analysis indicated that a large amount of the effluent load occurred during the transplanting period and just after fertilisation, and that recycling could reduce the effluent N load. In the case where paddy fields occupied the area, the effluent N load would be equal to the inflowing N load (net zero effluent) at a 48% recycling rate. However, in the case where upland fields (33%) and paddy fields (67%) occupied, 95% recycling rate was needed to achieve the net zero effluent. To implement the knowledge for reduction of effluent load from an agricultural area, we should solve the matter that the water environment deteriorates as pollutants accumulate with intensive recycling of runoff.

**Key words** : nitrogen, recycling irrigation, sustainable agriculture, paddy field, upland field

## 1. はじめに

農業地域からの負荷を削減するためには、圃場から排出される負荷の削減と同時に循環灌漑や用水の反復利用によって農業地域からの負荷排出を削減する流域レベルの対策が有効である。

農林水産省(1999)は、「持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律(平成11年法律第110号)」の施行にともない、施行規則(平成11年10月22日農林水産省令第69号)を公布し、局所施肥、肥効調節型肥料施用等の営農段階の技術を持続性の高い農業生産方式を構成する具体的な技術と定めた。

一方で流域レベルの負荷削減技術として、高濃度の硝酸態窒素を含む畑地からの排水を下流の水田で灌漑することによって農業系としての窒素排出を削減する地形連鎖を活用した窒素浄化の可能性が研究側から提示されている(黒田, 1998; 松森, 2004)。また、循環灌漑では通常の降雨年の場合には農業地域から排出される窒素及びリンの流出負荷が正味負となることが現地調査によって

明らかにされている(Takeda *et al.*, 1997; Takeda and Fukushima, 2004; Feng *et al.*, 2004)。しかし、これらの知見を技術的に体系化し、積極的に現地の農業系負荷削減へ適用するまでには至っていない。

圃場における営農段階の負荷削減技術は、室内実験と圃場試験によって普及可能な技術を確立することができる。しかし、循環灌漑や反復灌漑などの広域的な水利システムを使った排水管理によって負荷の流れをコントロールする技術を圃場試験のみによって開発することは困難である。この場合には、既往の知見をもとに循環灌漑や反復利用体系のモデル化を行い、様々な対策シナリオの効果を分析することによって現場適用の可能な技術としていくことが効果的である。

そこで、本稿では、水田・湿地の有する窒素除去機能を総括し、これらの機能を活用した農地排水の循環灌漑による農業系排出負荷削減対策について、仮想的な場合を数理模型で分析することにより、その効果と課題を検討した結果を報告する。

\* (独)農業工学研究所水工部 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

キーワード: 窒素, 循環灌漑, 持続的農業, 水田, 畑



(2) 畑

畑地の水移動は、暗渠排水が施工されている場を想定し Fig. 3 に示す並列型のタンクモデルによって表現した (Shiratani *et al.*, 2003)。図中の Tank 1, Tank 2 及び Tank 3 はそれぞれ土層の難透水性領域、易透水性領域及び亀裂をイメージしている。また、 $X_1 \sim X_3$ 並びに  $B_1$

$\sim B_3 =$  Tank 1 ~ Tank 3 の貯留高並びに相対断面積、 $S_1 + S_2$  及び  $r_3 =$  表面排水に関する流出孔の高さ及び孔係数、 $S_2$  及び  $r_1 =$  Tank 2 と Tank 3 の間の水移動孔の高さ及び孔係数、 $r_2 =$  Tank 1 と Tank 2 の水移動係数、 $r_4 =$  Tank 3 からの暗渠排水に関する流出孔係数である。畑地から流出する窒素は、大部分が硝酸態窒素

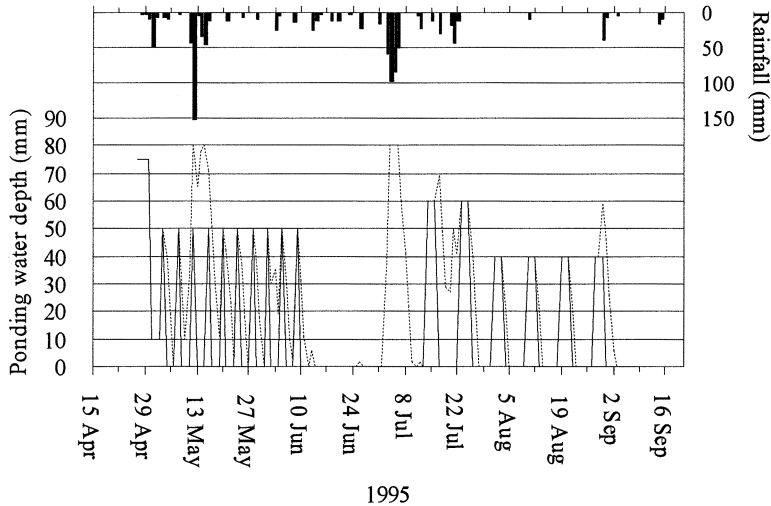


図-2 水田の目標水深（実線）と降雨を考慮した水深（点線）の計算結果の比較

Fig. 2 Target depth (solid lines) and calculated depth (dotted lines) with actual rainfall of ponding water in paddy field.

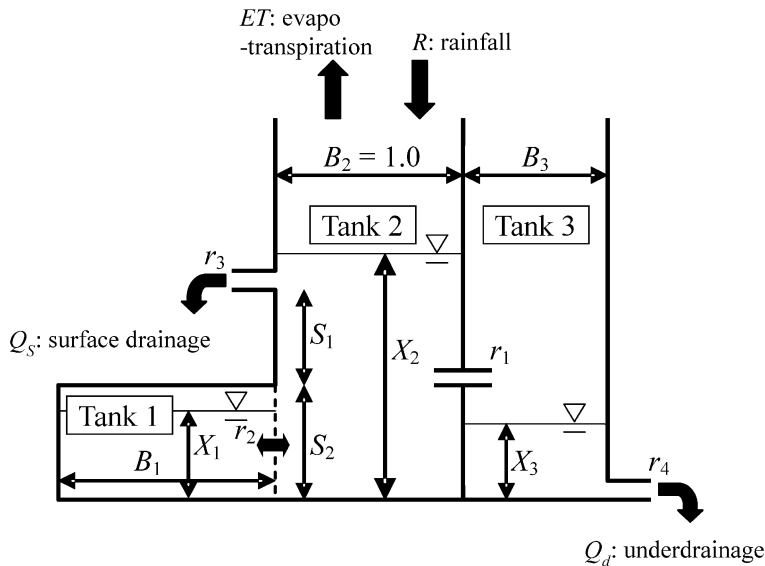


図-3 畑地の排水を計算するタンクモデル

Fig. 3 Tank model to calculate drainages from upland field.

(NO<sub>x</sub>-N) であるため、圃場内での窒素循環を Fig. 4 のようにモデル化 (白谷ら, 1996) した。反応の素過程は、[4] 式のような1次反応式で記述し、その温度依存は Arrhenius 則で表現した。

$$V = k' \exp\left[\frac{Ea \cdot (T - T')}{RTT'}\right] N, \quad [4]$$

ここで、 $V$  = 窒素反応速度 (kg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $N$  = 圃場内の窒素量 (kg m<sup>-2</sup>),  $k'$  = 基準温度における反応比速度 (d<sup>-1</sup>),  $Ea$  = 見かけの活性化エネルギー (J mol<sup>-1</sup>),  $R$  = ガス定数 (JK<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>),  $T$  = 地温 (K),  $T'$  = 基準温度 (K) である。畑地の地温は、気温の2次関数で近似できる (大場・桜谷, 1990)。

作物の窒素吸収速度は、[5] 式のロジスティック曲線をあてはめ、NH<sub>4</sub>-N と NO<sub>x</sub>-N の選択性は、圃場内の存在量に比例すると仮定した。

$$P = \frac{dp}{dt} = \lambda p \left(1 - \frac{p}{p_e}\right), \quad [5]$$

ここで、 $P$  = 作物の窒素吸収速度 (kg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $\lambda$  = 比成長速度 (d<sup>-1</sup>),  $p$  = 作物中の窒素含有量 (kg m<sup>-2</sup>),  $p_e$  = 収穫時の作物の窒素含有量 (kg m<sup>-2</sup>) である。

圃場からの窒素流出は、排水中の窒素濃度が圃場内の NO<sub>x</sub>-N 量に比例すると仮定し、[6] 式で表した。

$$L = \varepsilon N_N Q, \quad [6]$$

ここで、 $L$  = 窒素流出速度 (kg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $\varepsilon$  = 定数

(m<sup>-1</sup>),  $N_N$  = 圃場内の NO<sub>x</sub>-N 量 (kg m<sup>-2</sup>),  $Q$  = 圃場排水高 (m d<sup>-1</sup>) である。

以上の各反応過程の解は全て求めることができ、時間間隔  $\Delta t$  に対する差分方程式によって計算を進めることができる。

(3) 水路

圃場ブロックからの排水は、その量に従い Manning の平均流速公式によって計算された時間を要して地区の末端へ到達させ、その間の窒素濃度は [7] 式の Streeter-Phelps 式に基づき減少させた。

$$N_{\text{canal}} = N_{\text{canal},0} \exp\left(-\frac{\beta}{H} \tau\right), \quad [7]$$

ここで、 $N_{\text{canal}}$  及び  $N_{\text{canal},0}$  = 流下前及び後の窒素濃度 (mg L<sup>-1</sup>),  $\beta$  = 水路中の窒素減少速度定数 (m d<sup>-1</sup>),  $\tau$  = 流下時間 (d),  $H$  = 径深 (m) である。

(4) 調整池

調整池の中の窒素濃度の計算は、水田の場合と同様に水中の濃度変化を1次反応式で表現し、 $i-1$  日の値を用いた次式で  $i$  日の値を求めた。

$$N_{\text{reservoir},i} = \frac{(V_{i-1} - q_{\text{out},i}) N_{\text{reservoir},i-1} \exp\left(-\frac{\gamma A_{i-1} \Delta t}{V_{i-1}}\right) + \frac{q_{\text{in},i} N_{\text{canal},i} + A_i R_i N_{\text{rain},i}}{V_i}}{V_i} \quad [8]$$

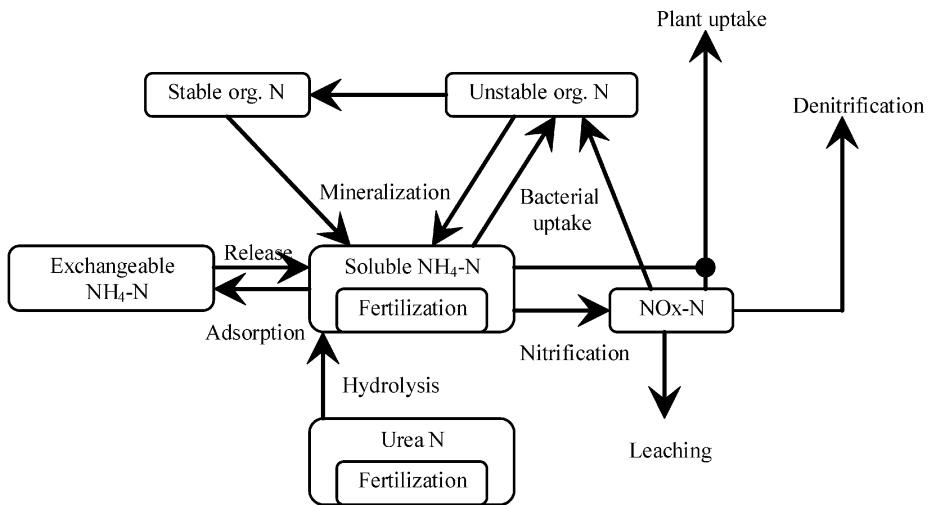


図-4 畑圃場内の窒素循環モデル

Fig. 4 Conceptual model of nitrogen cycle in upland field.

表-1 モデル分析の計算条件

Table 1 Calculating conditions for the analysis

Variables	Conditions
Depth of regulating reservoir	1.0 m
Rainfall	Eastern coast of Lake Biwa in 1995
N concentration of river water and precipitation	River water : 1.0 mg L <sup>-1</sup> Rainfall : 0.8 mg L <sup>-1</sup>
N removal rate in paddy fields and wetlands	Paddy fields : 0.025 m d <sup>-1</sup> Regulating reservoir : 0.025 m d <sup>-1</sup> Clay bottomed canal : 0.01 m d <sup>-1</sup>
Fertilizer in paddy fields	Basal dressing at transplanting : 40.0 kg ha <sup>-1</sup> Toppdressing : 20.0 kg ha <sup>-1</sup> in mid-June ; 35.0 kg ha <sup>-1</sup> in mid-July

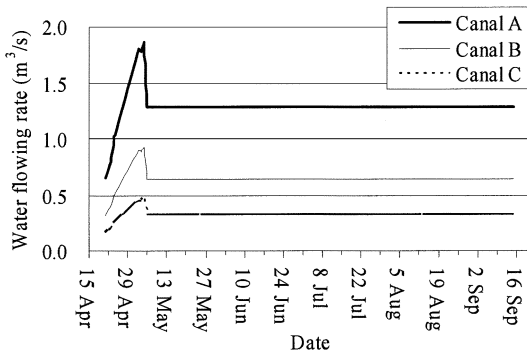


図-5 用水路の計画流量

Fig. 5 Required water flow in irrigation canals.

ここで、 $N_{\text{reservoir}}$  = 調整池の窒素濃度 (mg L<sup>-1</sup>),  $V$  = 調整池貯留量 (m<sup>3</sup>),  $A$  = 調整池水面積 (m<sup>2</sup>),  $\gamma$  = 調整池内の窒素減少速度定数 (m d<sup>-1</sup>),  $q_{\text{in}}$  及び  $q_{\text{out}}$  = 調整池への導水量及び取水量 (m<sup>3</sup>) である。

2.2 水田地帯の循環灌漑

Figure 1 の水及び窒素の循環を数理モデル化し、Table 1 の条件で農地排水の循環利用率と地区からの排出窒素量の関係を分析した。

水田の用水は、ブロック内の代掻き・田植えが6日間で均等に実施されるような用水計画とし各水路の流量を Fig. 5 のとおり設定した。排水路は、一般的な排水計画に基づき設計流量を算定し規模を決定した。

農地排水は、調整池の容量に空きがある限り調整池へ導入し、灌漑水には調整池の貯留水を優先的に循環使用することとした。その分、河川からの新規取水量は減少させることができる。降雨及び河川の窒素濃度は 1 mg

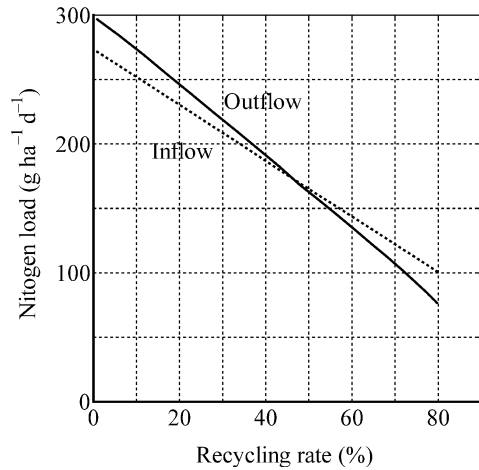


図-6 循環灌漑率に対する水田地域への流入窒素負荷量及び流出窒素負荷量

Fig. 6 Relationship of inflowing N load and outflowing N load of the paddy fields area to the recycling rate.

L<sup>-1</sup>とした。また、水温は 25°C で一定とした。

Figure 6 に循環灌漑率と農地ブロックへの流入負荷及び流出負荷の関係を示す。循環灌漑用の調整池の規模を大きくすることで循環灌漑率を上げることができ、農地排水の循環再利用によって水源からの導水量が少なくなるため河川から農業地域への流入負荷も減少する。同時に、農業地域から系外への流出水量及び流出負荷が減少した。調整池の水深を 1.0 m、面積を 8.9 ha と設定した場合に循環灌漑率が 48% となり、正味の流出負荷をゼロとすることができた。Table 2 に、水田、水路及び調

表-2 灌漑期の水田、調整池及び水路における窒素収支 (148日間)

Table 2 N balances in paddy fields, regulating reservoirs and canals during an irrigation period of 148 days

	Inflowing N (kg)	Outflowing N (kg)	Removed N (kg)	N removal rate per unit area ( $\text{g ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ )
Paddy fields (400 ha)	11,417.2	8,244.7	3,173.5	53.6
Regulating reservoir (8.9 ha)	9,059.0	8,765.8	293.2	222.6
Drainage Canals (1.5 ha)	19,169.2	19,143.8	25.4	114.4

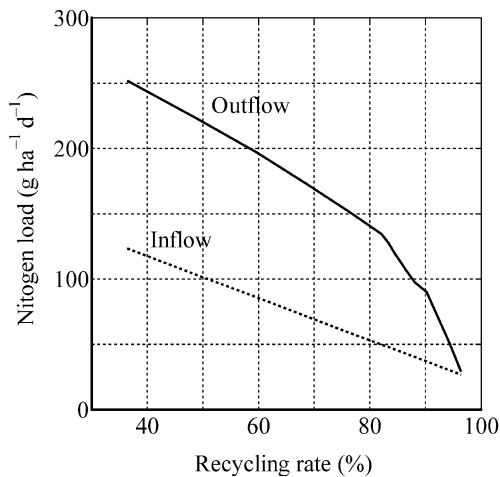


図-7 循環灌漑率に対する水田 &amp; 畑地域への流入窒素負荷量及び流出窒素負荷量

Fig. 7 Relationship of inflowing N load and outflowing N load of the paddy fields and upland fields area to the recycling ratio.

調整池における窒素収支をまとめるが、水田での窒素除去が流出負荷削減に大きく寄与していることがわかるが、単位面積当たりの窒素除去量は調整池が最も大きい。

### 2.3 畑地を含む農業地域での循環灌漑

前節の検討に続き、200 ha の畑作 ( $130 \text{ kg ha}^{-1}$  の窒素施肥) ブロックが付加され、畑地排水を調整池へ流入させ、水田灌漑水として再利用する場合についても検討した。

農地に 33% の畑地を含むケースの場合には、Fig. 7 に示すように、正味の流出負荷をなくするには 95% の循環利用が必要という結果となった。また、循環灌漑とともに用水の窒素濃度が上昇し、循環率 95% の場合には灌漑水の期間平均濃度は  $2.6 \text{ mg L}^{-1}$  となった。日高 (2000) 及び森川ら (1982) は、農業用水の窒素濃度は 3

$\text{mg L}^{-1}$  以下の場合、水稻の生育障害は発生しなかったことを報告しているが、水田の施肥量規制によってイネの正常な成長を保証する必要もあろう。そのうえで、循環灌漑は農業系負荷削減に有効な方法である。

### 3. おわりに

水田地帯の循環灌漑と畑地排水再利用について、既往の知見を統合・モデル化し、農業系排出負荷削減の効果と課題をモデル分析した。水源の窒素濃度が  $1 \text{ mg L}^{-1}$  の場合、水田地帯では循環灌漑率が 48% 以上で水田地帯からの正味の窒素排出負荷はなかった。また、水田面積の 33% を  $130 \text{ kg/ha}$  の窒素施肥を行う畑地として地区排水を循環利用する場合には、正味排出負荷をゼロとするためには 90% 以上の循環率が必要となった。一方、循環灌漑とともに地区内の用排水の窒素濃度は高くなり、適切な循環灌漑率の設定と浄化対策の必要性が明らかになった。

農業用水は、灌漑水だけでなく防火用水や生態系保全、景観形成等の環境用水としての重要性が指摘されている (中西, 2002)。循環灌漑によって系外へ流出する負荷を削減すると同時に、農業地域の水質環境を保全することが必要である。

農業水利システムを対象とした研究成果の検証は、農業農村整備事業の場で行われる以外にない。自然・社会という極めて複雑なシステムを対象としたものであるため、検証の結果は必ずしも予測通りにならない場合も多い。その結果を研究へフィードバックし、更なる研究の進展によって技術確立がなされる。このような技術開発過程の中で数値モデルが果たす役割は大きい。

### 引用文献

Feng, Y.W., Yoshinaga, I., Shiratani, E., Hitomi, T. and Hasebe, H. (2004): Characteristics and Behavior of Nutrients in a Paddy Field Area Equipped with a Recycling Irrigation System. *Agricultural Water Management* 68 : 47-60.

- 日高 伸 (1990) : 水稻の生育・土壌に及ぼす灌漑水質の影響とその限界濃度に関する研究. 埼玉県農試研報, **44** : 1-93.
- 黒田久雄 (1998) : 地形連鎖を活用した流域水環境保全手法. 農土誌, **66** (12) : 19-23.
- 松森堅治・飯嶋孝史・石田憲治・嶺田拓也 (2004) : 地形連鎖を利用した窒素浄化ができる地域の推定. 農村計画学会学術研究発表会要旨集, pp. 41-42.
- 森川昌記・松丸恒夫・高崎 強・松岡義浩 (1982) : 水質汚濁が稲作に及ぼす影響. 千葉県農総試研報, **23** : 83-89.
- 中西滋樹 (2002) : 農業用水の地域用水機能の維持・増進. 農土誌, **70** (9) : 799-802.
- 農林水産省 (1999) : 持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律施行規則 (平成 11 年 10 月 22 日農林水産省令第 69 号).
- 大場和彦・桜谷哲夫 (1990) : 畑作物の気象生態反応と自然エネルギーの効率的利用技術. グリーンエナジー計画成果シリーズV系 (生産技術体系), **4** : 3-19.
- 白谷栄作・戸原義男・四ヶ所四男美・井上久義 (1996) : 麦作圃場からの窒素流出簡易評価モデルの開発. 農業土木学会論文集, **181** : 107-113.
- Shiratani, E., Yoshinaga, I. and Singh, R.K. (2003) : Model Analysis for Nitrogen Effluent from Upland Field Constructed with Under-drain. *Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Diffuse Pollution & Basin Management*, **4**, August 17-22, 2003, Dublin, Ireland : 43-48.
- Shiratani, E., Yoshinaga, I., Feng, Y. and Hasebe, H. (2004) : Scenario Analysis for Reduction of Effluent Load from Agricultural Area by Recycling the Run-off Water. *Water Science and Technology*, **49** (3) : 55-62.
- Tabuchi, T. (2001) : Nitrate removal in the flooded paddy field, *Proc. of an International Workshop on Efficiency of Purification Processes in Riparian Buffer Zones*, Organizing Committee for International Workshop of Riparian Buffer Zones (ed.), November 59, 2001, Kushiro, Japan : 81-90.
- Takeda, I., Fukushima, A. and Tanaka, R. (1997) : Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system. *Water Research*, **31** (11) : 2685-2692.
- Takeda, I. and Fukushima, A. (2004) : Phosphorus purification in a paddy field watershed using a circular irrigation system and the role of iron compounds. *Water Research*, **38** (19) : 4065-4074.
- Yoshinaga, I., Feng, Y.W., Hitomi, T., Shiratani, E. and Hasebe, H. (2003) : Nitrogen removal function of a paddy field in a circular irrigation system, *Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Diffuse Pollution & Basin Management*, **4** August 17-22, 2003, Dublin, Ireland : 43-48.

受稿年月日：2004年11月30日

受理年月日：2005年1月19日

## 白谷栄作氏講演に関する質疑

溝口 勝 (東京大学大学院農学生命科学研究科) :

今日の講演内容は全体シナリオのどこに位置付けられ、また全体シナリオの目標はいつ頃に達成されるのか。

白谷 :

これは、総合科学技術会議で定めた自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシアティブの中で行なわれている研究である。

シンプルな系を考えたモデル分析は、モデル開発の段階として行っている。モデル開発は、現況把握と対策のシナリオ分析のために行う。今日紹介したモデルは、循環灌漑だけを捉えて、その効果と課題を抽出するために用いる。最終的には、流域の健全な状態を実現するための政策シナリオを提示する。

循環灌漑の他にも、負荷軽減対策がある。都市域の問題もあれば、森林の問題、水産の問題もある。森林総合研究所や水産工学研究所などで開発中のモデルを統合し、これらを縫合したモデルが別途必要になるが、これについては本日紹介していない。愛知県の油ヶ淵一帯において、都市域と畑地、面積的には僅かだが森林域を対象に、仮説がうまく成立したモデルは既に作成している。

流域全体を対象とした水循環・物質循環モデルとして現況を把握し、問題解決シナリオの分析が出来るようになるのは、現在のイニシアティブの終了時点である2年後の見込みである。

吉川省子 (独)農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部) :

通常の施肥を行いつつ、調整池で脱窒を促進し、窒素を除去するという話があったが、施肥量を減らしたら調整池を縮小出来るのではないか。また、系内に有機物や重金属が蓄積するのが問題とのことだが、堆肥ではなく化成肥料を主に用いれば、この点についてはあまり問題にならないのではないか。

白谷 :

減肥がもたらす効果についてはまだ分析していないが、今回紹介したモデルで分析可能である。但し、圃場レベルで行われている、側条施肥とか紙マルチの様な農林水産省の進める環境保全型農業の対象となる技術の効果や、緩効性肥料の効果については、今回紹介したモデルでは分析出来るようになっていない。今後、出来る限りこれらの効果を分析出来るようにモデルを改良したいと考えている。

循環灌漑が70%以上を占める小貝川流域の水田地帯で調査した事例では、水田の中で生成される有機物は全てが水田中で分解される訳ではなく、分解されないで残る有機物もある。これが排水と共に流出し、流出水を循環灌漑すると水田に新しい有機物として加わることになる。この地域では、化成肥料の施肥が主であるが、循環灌漑ではどうしても有機物が蓄積すると考えている。これに堆肥が加われば、さらに有機物が蓄積する。実際に、循環灌漑を熱心に行っているところでは、化成肥料地帯でもCOD濃度で15~20ppm、TOC濃度で7~8ppm位の有機物が蓄積しており、重金属も有機物と共に蓄積している。

長 裕幸 (佐賀大学農学部) :

燐は土壤に吸着し易い物質であるが、流出している部分もあると思う。閉鎖水系の水質を考えるのであれば、燐についても別途解析する必要があるのではないかと。

白谷 :

閉鎖性水域の物質の動態を解析するためには、窒素と燐で植物プランクトンが増殖するという生態系モデルを使用する。通常、流域の中には閉鎖性水域が含まれることから、燐についても扱う必要性があることは承知しており、その試みは行っている。しかし、窒素を対象としたモデルよりも高度なモデルを用いる必要があること、複雑なモデルは計算の実行に支障するほど重くなるなど、燐を対象としたモデル開発に向けた課題はまだ多く残っている。

井上久義 (独)農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部) :

畑のモデルを紹介頂いたが、タンクモデルでは土壤の亀裂中の水とか、水田の湛水のような自由水はある程度実際に近いものとして表現されると思うが、土壤水の水位はあくまで仮想的なものである。両者の間の水の行き来が両者の水位差でうまく表されるのか疑問に思っている。タンクモデルを使えば流出量は実測値と合わせることが出来ると思うが、水質を議論する場合には、どこを経由して流出しているのかということも重要だと思う。その辺については如何か。

白谷 :

このモデルでは、流出量の評価のみである。タンクモデルは概念モデルであり、タンクとして表現されている場の変化、例えば圃場内が改変された場合に実測値と合う保障はない。将来的にはご指摘のように、圃場内などで起きているメカニズムをより忠実にモデル化する必要があるかと思う。