

# 黒ボク土農耕地における間隙水中の硝酸態窒素濃度および浸透流出量の推定法の開発 Development of estimation method of NO<sub>3</sub>-N concentration and leaching amount on a cropped Andosol

遠藤 明\*・三島 慎一郎\*\*・神山 和則\*\*

Akira ENDO\*, Shin-ichiro Mishima\*\* and Kazunori Kohyama\*\*

**1. はじめに** 農畜産活動に起因する数々の水質汚染の事例は、2000 年頃から多数報告されるようになり、農業は今や生産活動だけではなく、環境破壊の一因という側面を持つに至ったといえる。本研究の目的は、農耕地に蓄積されている無機態窒素が環境に対してどの程度の負のインパクトを与えるのかという事象を把握することにある。この目的を達成するため、有限要素法汎用ソルバーを用いた窒素溶脱モデルを開発し、黒ボク土農耕地の化学肥料連用試験結果とモデルを用いた計算結果との整合性を検証したので報告する。

## 2. 材料および方法

**(1) 試料の物理性:** 土壌試料(攪乱土と不攪乱土)は栃木県農業試験場(栃木県宇都宮市)のキャピラリーライシメータ付近の深度 $z=10, 30, 50, 70$ および $90\text{ cm}$ から採取した。図1にキャピラリーライシメータの構造と土壌断面の観察結果を示す。地表面から $z=50(\text{cm})$ までは表層多腐植質黒ボク土、 $z=50(\text{cm})$ 以深は風化腐朽スコリアを含む今市軽石層であった。仮比重は、 $z<50(\text{cm})$ において約 $0.75(\text{Mg m}^{-3})$ で、 $z>50(\text{cm})$ では約 $0.46(\text{Mg m}^{-3})$ であった。飽和透水係数は $7.26 \times 10^{-4} \sim 1.69 \times 10^{-3}(\text{cm s}^{-1})$ であり透水性が良好な土壌といえる。なお、 $z=90(\text{cm})$ がキャピラリーライシメータの底面である。

**(2) 窒素溶脱量の算定方法:** キャピラリーライシメータ内の無機態窒素濃度・底部からの窒素溶脱量と浸透水量を算定するため、有限要素法汎用ソルバーFlexPDE V.5.0.12 (PDE Solution Inc.)を用いた数理モデルを開発した(Endo et al.,2009)。計算空間次元は鉛直方向 1 次元、地表面 $z=0(\text{cm})$ ～深度 $z=90(\text{cm})$ を解析領域の対象とした。はじめに、採土した土壌の物理性・化学性の諸パラメータを数理モデルに入力した。次に、(i)蒸発散量を考慮した水分移動方程式、(ii)施肥窒素の形態変化(硝化および脱窒)・作物体の窒素吸収・地力窒素の発現・窒素の有機化・無機態窒素の土壌への吸着を考慮した、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の移流分散方程式および(iii)液状水の移流を考慮した熱伝導方程式を組み込んだ数理モデルを用いて、作物生育期間中のライシメータ土壌の無機態窒素濃度と、 $z=90(\text{cm})$ における窒素溶脱量・浸透水量を算出した(図2)。開発した数理モデルの妥当性を検証するために、キャピラリーライシメータの $z=90(\text{cm})$ に

おける硝酸態窒素フラックスと浸透水量の実測値(栃木県農業試験場, 2003)と開発した数理モデルによる計算値とを比較し、且つ、一般的に広く使用されているHydrus-1D V. 3.00を用いた計算値とも比較した。最後に、実測値と計算値との二乗平均平方根誤差(以下、RMSEと記す)と $t$ 値を算出して統計処理を行い、有限要素法汎用ソルバーを用いて開発した窒素溶脱モデルの妥当性を検証した。

## 3. 実験結果および考察

**(1) 実測値と計算値の比較:** 図3(a)と図3(b)に、それぞれ、作物生育期間中の累積浸透水量( $\text{cm}$ )と硝酸態窒素の累積フラックス( $\text{kgN ha}^{-1}$ )の実測値(横軸)と計算値(縦軸)の関係を示す。同図の 印と 印はそれぞれFlexPDEとHydrus-1Dを表している。

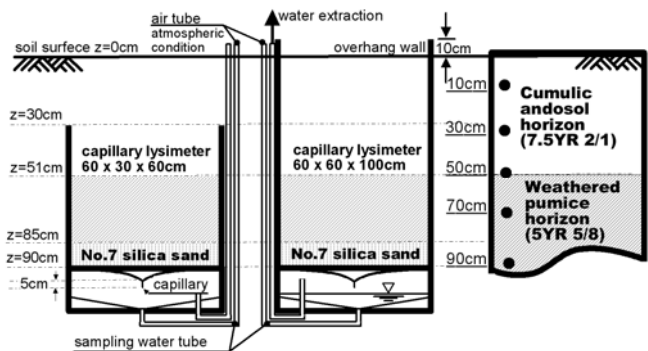


図1 キャピラリーライシメータの構造と土壌断面観察結果

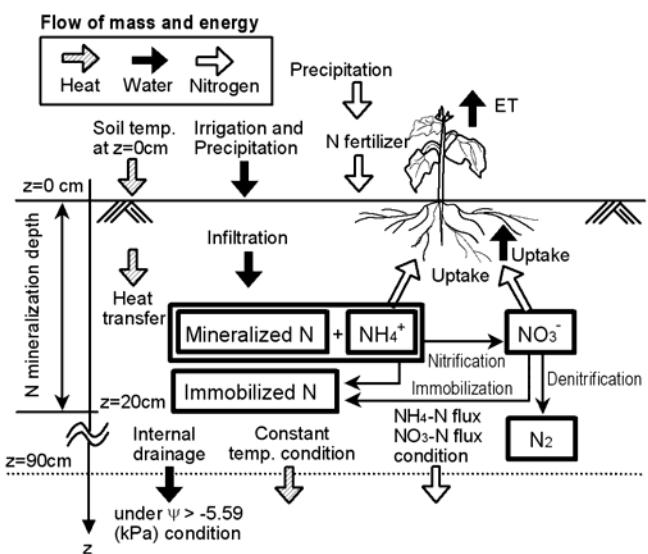


図2 FlexPDE による水・溶質・熱輸送モデルの概要

\* (学)東洋食品工業短期大学 \*\* (独)農業環境技術研究所 Toyo Collage of Food Technology \*\*National Institute for Agro-Environmental Sciences  
黒ボク土農耕地, キャピラリーライシメータ, 硝酸態窒素溶脱量, 窒素溶脱モデルの開発

FlexPDE モデルを用いて計算した累積浸透水量の結果は、Hydrus-1D よりも 1:1 直線の近くに分布していた(図3(a))。硝酸態窒素の累積フラックスの結果についても同様、FlexPDE モデルを用いた計算結果のほうが 1:1 直線の近くに分布していた(図3(b))。実測値  $x$  と計算値  $y$  が  $y = \alpha x + \beta$  (ただし、 $\alpha = 1, \beta = 0$ ) に合致するかどうか、自由度  $f = 24$ 、5% 有意水準のもと  $t$  検定を行ったところ、切片  $\beta = 0$  を得たものの、傾き  $\alpha = 1$  は得られなかった。実測値  $x$  と計算値  $y$  をそれぞれ  $x$ - $y$  平面上にプロットした時の直線の傾き  $\alpha$  が、どの程度 1 に合致しているのかということを検討するために、 $t$  値を算出(表1)した後、その絶対値をとった。Hydrus-1D モデルの  $t$  値の絶対値が、FlexPDE モデルの  $t$  値の絶対値よりも 30 ~ 40 倍大きかった事から、Hydrus-1D モデルよりも FlexPDE モデルを用いて計算した諸量の方が妥当であることが判った。

**(2) 生育期間中の黒ボク土農耕地中の硝酸態窒素濃度分布の経日変化:**

土壌間隙水中の硝酸態窒素濃度のイソプレットを図4(e)に示す。施肥直後から硝酸化成作用により表層土壌中の硝酸態窒素濃度が増加し、降水後の浸潤水とともに無機態窒素が下方へと溶脱される傾向にあった。特に(A)部においては、レタス作付の元肥を 220(kgN ha<sup>-1</sup>) 施用した後に断続的な降水が生起し、元肥した分の窒素が硝化しながら溶脱されていることが判った。(B)部においては、トウモロコシの生育期間終期において、硝化が完了した表層土壌の窒素が、日降水量 130(mm)の大雨によって一気に降下浸透し、深度  $z = 30$ (cm) 付近の硝酸態窒素濃度が最も高くなることが判った。この(B)部において確認された現象は、2001 年 9 月 ~ 10 月に作付されたレタス(2001 年 10 月中旬)の土壌深度  $30 < z < 60$ (cm) においても同様に確認された。本圃場の作付体系のトウモロコシとレタスにおいては、1(ha)当たり 220 ~ 230(kg)もの窒素肥料が投入されていたことから、レタスの収穫期(2000 年 11 月初め)を過ぎて、オオムギの生育期間に入ってもなお、深度  $z = 60$ (cm) 以深の硝酸態窒素濃度が高い状態が継続している。このことは、深部土壌が養分過多であることを意味している。なお、2000 年 9 月 ~ 2001 年 7 月にかけて深度 60(cm) 以深の硝酸態窒素が 20 ~ 30(mg L<sup>-1</sup>) と非常に高い原因は、2000 年 7 月以降に作付したトウモロコシとレタスの元肥の多さに由来すると考えられる。一般に、ムギ類は深根性の作物であるため、深部土壌に残存している栄養塩類も吸収して生育していると考えられる。しかし、ムギ類の生育に必要な窒素吸収量は、他の作物と比較して少ないため、深部土壌に残存している余剰窒素をすべて吸収しないことが判った。

**4. おわりに** 農耕地に蓄積されている余剰窒素が環境に対してどの程度の負のインパクトを与えるのかという事象を定量的に把握することを目的に、黒ボク土農耕地の深度  $z = 90$ (cm) から浸透流出する硝酸態窒素フラックスと浸透水量を計算する取扱簡便な新しい数理モデルを開発し、モデルの妥当性を検証した。今後は、灰色低地土農耕地(樹園地)での地象・気象観測を併用し、農耕地周辺の水域環境に及ぼす負荷を定量し、作物生育と環境面双方の観点から推奨できる施肥量を算定したい。

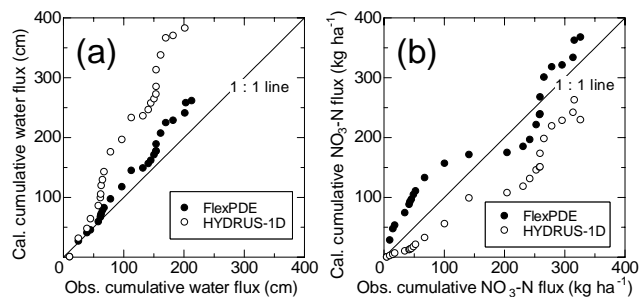
**引用文献**

A. Endo, S. Mishima and K. Kohyama (2009): Modeling nitrate leaching on a cropped Andosol, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 85(1), pp. 41-61  
 遠藤明, 三島慎一郎, 神山和則 (2008): 黒ボク土と灰色低地土農耕地の無機態窒素浸透流出量と地表面窒素収支量の関係, 平成 20 年度農業農村工学会大会講演要旨集, pp. 946-947  
 栃木県農業試験場 (2003): 平成 14 年度環境技術部試験成績書, 有機物利用による施肥法の確立, pp.100-103

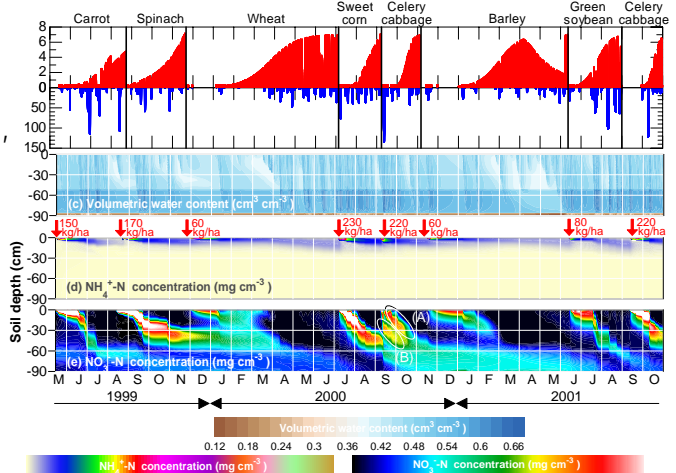
**表1 1:1 直線の傾き  $\alpha$  に関する統計解析結果**

	FlexPDE		Hydrus-1D	
	RMSE	$T$ -value*	RMSE	$t$ -value*
Water flux	24.38	5.33	150.20	-160.26
NO <sub>3</sub> -N flux	24.85	4.76	42.42	-206.96

\*自由度  $f = 24$ , 5% 有意水準で  $t$  検定を実施 ( $t(0.05, 24) = 2.063$ )



**図3 累積浸透水量と累積NO<sub>3</sub>-Nフラックスの関係**



**図4 蒸発散量(a), 日降水量(b), 体積含水率(c), NH<sub>4</sub>-N濃度(d), NO<sub>3</sub>-N濃度(e)の経日変化**  
 赤色の矢印「 $\uparrow$ 」と数値は、それぞれ施肥時期と施肥量を表す