

家畜糞尿に含まれる窒素の農地土壌中での挙動

Fate of Liquid Dairy Manure Nitrogen in an Irrigated Double Crop Corn-Grain Rotation

中村公人* , Thomas Harter ** , Marsha C. Mathews *** , Roland D. Meyer ** , 三野 徹*
Kimihito Nakamura, Thomas Harter, Marsha C. Mathews, Roland D. Meyer, and Toru Mitsuno

1. はじめに California では酪農業が盛んで、家畜糞尿は飼料作物生育のための肥料として農地に投入される。酪農地域は Central Valley 内に分布しており、土壌が砂質土で、浅層地下水帯を有しているために、過剰な家畜糞尿の投入によって直ちに硝酸態窒素や塩類による地下水汚染が引き起こされ、多数の飲用水井戸の閉鎖に及んでいる。こうした背景から、「家畜糞尿の最適管理」が要求されている。ここでは、最適管理法確立の第一段階として、家畜糞尿を農地に投入した場合の土壌中窒素挙動の定量化を試みた。

2. 調査地概要 調査地には、Central Valley の沖積低地に位置する典型的な酪農経営体を選定された。土壌は壤質砂土または砂土で、排水性が良く、保水能が低い。地下水位は深さ 1.8~3.0m である。酪農地に隣接して二毛作（夏期：トウモロコシ、冬期：穀物作物）が行われ、トウモロコシは 4~6 月に作付け、8~9 月に収穫、穀物作物は 10 月に作付け、4 月に収穫される。乾季である夏期に約 10 日間断でポーター灌漑が行われる。穀物作物の必要水量は晩秋の灌漑と冬期の降水（平均 380mm）で賄われる。この地域では、液体状の糞尿を貯水池に貯めて農地に投入する方法が、河川に直接排水させる代替法として導入されてきた。1998 年以前には、作付け前や雨季前に貯水池の液状糞尿を農地へ還元し、トウモロコシに対しては化学肥料を与えていた。こうした過剰な窒素投与を行っていた管理法（CMM；Conventional manure management）から 1998 年に作物の吸収量に見合うような糞尿施肥に切り替えた（TMNM；Targeted manure nutrient management）。この管理法では、基本的に化学肥料を施用せず、液状糞尿に含まれている窒素成分を考慮して、地表水と希釈した液状糞尿を与えている。

3. 測定項目 農地に投入される糞尿中の窒素量は、農地へ導入する灌漑用パイプ内の流速、灌漑時間、パイプ内の有機態窒素 Org-N、アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度から求めた。夏期の各灌漑前、各作物の収穫直後に深さ約 120cm までを 5 層に分けて採土し、土壌水分量、土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度（1M KCl 抽出）を測定した。また、各作物の収穫時の植物体内窒素量分析により、作物窒素吸収量を求めた。気象項目（降雨量、蒸発散位）は近隣の観測ステーションのデータを援用した。

4. 解析モデルと感度解析 解析対象期間は 1998 年 4 月 28 日~2001 年 9 月 21 日である。不飽和土壌中の水分・窒素挙動モデルとして、HYDRUS-1D（Šimůnek et al., 1998）を用いた。ただし、HYDRUS では 1 種類の作物しか扱えないため、解析期間を分割することで 2 種類の作物に対処した。解析領域は地表面から深さ 3m、下端境界は地下水位一定条件とした。水分移動方程式は Richards 式に根の吸水を組み込んだものである。対象とした窒素形態は Org-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ である。よって、形態変化として、無機化（Org-N \rightarrow $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、硝化（ $\text{NH}_4\text{-N}$ \rightarrow $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、脱窒（ $\text{NO}_3\text{-N}$ 気体）を考慮した。

* 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

** University of California, Davis, Department of Land, Air and Water Resources

*** University of California Cooperative Extension

Keywords：家畜糞尿，窒素，感度解析

$$\text{Org-N} : \frac{\partial \theta c_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_1 \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c_1}{\partial z} - k_{\min} \theta c_1 - k_{\min} \rho s_1 \quad (1)$$

$$\text{NH}_4\text{-N} : \frac{\partial \theta c_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_2 \frac{\partial c_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c_2}{\partial z} + k_{\min} \theta c_1 + k_{\min} \rho s_1 - k_{\text{nit}} \theta c_2 - k_{\text{nit}} \rho s_2 - S c_2 \quad (2)$$

$$\text{NO}_3\text{-N} : \frac{\partial \theta c_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_3 \frac{\partial c_3}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c_3}{\partial z} + k_{\text{nit}} \theta c_2 + k_{\text{nit}} \rho s_2 - k_{\text{den}} \theta c_3 - S c_3 \quad (3)$$

c は水溶態濃度 (mgN cm^{-3}), s は吸着態濃度 (mgN g^{-1}), θ は体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), ρ は乾燥密度 (g cm^{-3}), D は分散係数 ($\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$), S は根の吸水項 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$), q は水分流束 (cm d^{-1}), t は時間 (d), z は鉛直座標 (cm), k_{\min} , k_{nit} , k_{den} はそれぞれ 1 次の無機化・硝化・脱窒の反応速度 (d^{-1}) である。添字 1, 2, 3 はそれぞれ Org-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ を表す。また, 窒素形態変化が低土壌温度で抑制されることを考慮するために, 冬期の反応速度を全て 0 とした。土壌中の Org-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ の等温吸着曲線は線形とした (分配係数 $k_{s\text{Org-N}}$, $k_{s\text{NH}_4\text{-N}}$ ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$))。

土壌水分特性曲線と不飽和透水係数のパラメータは, 水分移動解析と実測土壌含水量から逆同定により推定した。また, $k_{s\text{NH}_4\text{-N}}$ は作物窒素吸収量をもとに推定した (0.52)。窒素挙動に関する未知パラメータを k_{\min} , k_{nit} , k_{den} , $k_{s\text{Org-N}}$ に絞り, 感度解析によりこれらを推定した。すなわち, 各パラメータを変化させ (計 1470 パターン), 土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 量の実測値と計算値の RMSE が最小になるときのパラメータを決定した。最適値は, $k_{\text{den}}=0$, $k_{s\text{Org-N}}=10000$, $k_{\text{nit}}=0.1$, $k_{\min}=1.6$ となった (Fig.1)。ただし, 図より k_{\min} の感度は k_{nit} に比べて低く, その値に幅 (0.1 ~ 100) がある。また, $k_{s\text{Org-N}}$ の感度はその値が 1 ~ 10 以上で低かった。

5. 土壌中の窒素挙動 感度解析から得られた最適パラメータを用いて計算を行い, 以下の知見を得た。脱窒は無視でき, 無機化 (半減期 1 ~ 7 日) と硝化 (半減期 7 日) が活発で, 下端境界からは $\text{NO}_3\text{-N}$ のみが溶脱する。Org-N の吸着能が極めて高い。TMNM に転換してから 2, 3 年目に $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量が低下した (Fig.2)。2001 年のトウモロコシ作期に 1998 年と同レベルの $\text{NO}_3\text{-N}$ が溶脱しているが (Fig.2), これは投入窒素量だけでなく灌漑水量が多量であった影響が大きいと考えられる。地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は 2000 年冬期に一旦上昇したが徐々に低下している。今後, モデルをもとに最適な糞尿管理を検討する。

引用文献 Šimůnek, J., M. Sejna, and M. Th. van Genuchten. (1998): The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media Ver. 2.0, U.S. Salinity Lab., 178p.

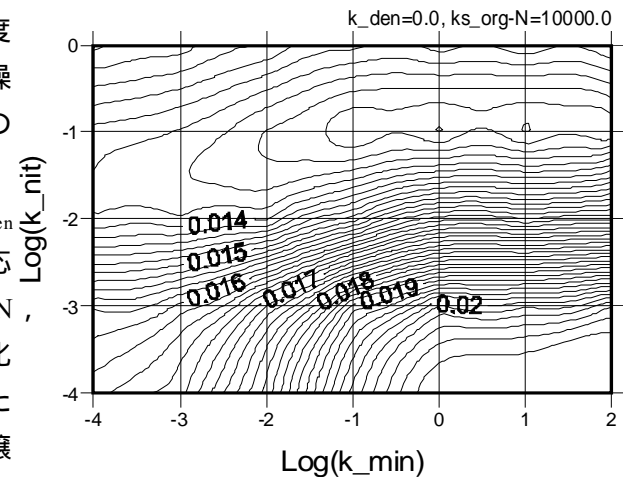


Fig.1 土壌中 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 量の RMSE マップ一例
An example of contour maps of root mean square error (RMSE) between measured and calculated total $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ amounts in soil.

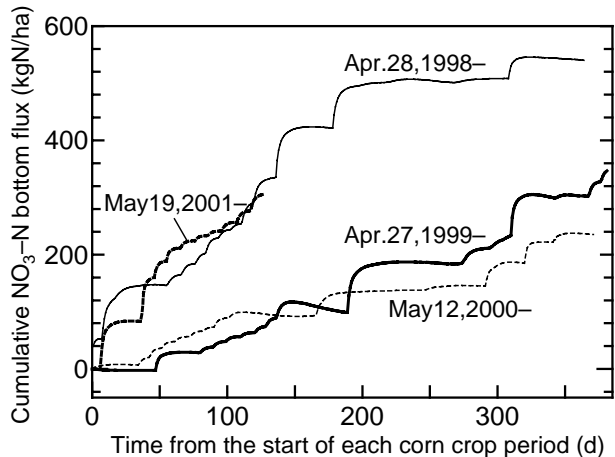


Fig.2 下端境界での $\text{NO}_3\text{-N}$ 積算溶脱量変化
Cumulative $\text{NO}_3\text{-N}$ flux at the bottom boundary (3m depth) for each crop year.