

牛糞堆肥を施用した水田土中の窒素動態の観測

Observation of nitrogen dynamics in paddy soil applied with cow manure compost

土壌圏システム学研究分野 522M218 井手 海盛

主査：渡辺 晋生

I はじめに

有機物を肥料として水田に施用する機会が増えている。土中の有機物中の有機態窒素 Org-N は無機化、硝化を経てアンモニア態窒素 NH₄-N、硝酸態窒素 NO₃-N となり作物に吸収される。しかし、無機化や硝化量は土中の温度・水分量に依存し、脱窒による N₂ ガス化や、土中水流れに伴う溶脱により、土中の窒素量予測は困難である。最適時期に適切量の有機物を施用するには、土中での窒素動態を明らかにする必要がある。本研究では、水田に施用した有機物由来の窒素動態を明らかにすることを目的とし、現場観測から土中の NH₄-N、NO₃-N 変化量とイネの窒素吸収変化量を明らかにする。そして、数値解析で硝化、脱窒も考慮し、反応速度定数に温度・水分依存性を与えることで、水分・熱移動式とともに窒素移動を計算した。

II 窒素の形態変化反応速度および収支

1. 形態変化反応速度

無機化、硝化、脱窒の反応速度は一次分解反応式で表されることが多い (式 1)。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_{\text{NH}_4\text{-N}} &= k_{\text{min}} C_{\text{Org-N}} \\ \frac{d}{dt} C_{\text{NO}_3\text{-N}} &= k_{\text{nit}} C_{\text{NH}_4\text{-N}} \\ \frac{d}{dt} C_{\text{N}_2} &= k_{\text{den}} C_{\text{NO}_3\text{-N}} \end{aligned} \quad (\text{式 1})$$

ここで、 k_{min} 、 k_{nit} 、 k_{den} [1/d] はそれぞれ無機化、硝化、脱窒速度定数である。

2. 窒素収支

NH₄-N の揮発を無視できるとすると、無機化量は次の収支式で表される (式 2)。

$$N_{\text{無機化}} = N_{\text{貯留}} + N_{\text{吸収}} + N_{\text{浸透}} + N_{\text{脱窒}} \quad (\text{式 2})$$

ここで、 $N_{\text{貯留}}$ [g/m²] は NH₄-N、NO₃-N の土中変化量、 $N_{\text{吸収}}$ 、 $N_{\text{浸透}}$ [g/m²] は溶存 NH₄-N、NO₃-N の作物吸収量、下方浸透量である。

III 現場観測

1. 調査圃場と方法

三重大学内圃場に 2.25 m² の水田 8 区画を準備した (Table 1, Plot 1-8)。2022 年の 3/17 に CN 比 26 の牛糞堆肥を窒素換算で 0, 4, 8, 16 g/m² になるように 10 cm 深まで施用した (N0, N4, N8, N16 区とする)。5/1 まで全区画裸地で管理し、代かきを行った 5/2 以降は湛水で管理した。5/31 に再度代かきを行った。6/3 にイネ (コシヒカリ) を移植し、9/13 に収穫した。栽培期間中、生育段階毎に各区画からイネを 2 株採取し、生育調査を行った。各部位 (穂、葉、茎) の窒素含有率、乾物重を測定し、窒素含有率と乾物重の積から窒素吸収量を算出した。期間中圃場の 2 m 気温、降水量、日射量、湛水深、土中 5, 15, 25 cm 深の地温、体積含水率、土中 15, 25 cm 深の土中水圧力を 10 分間隔でモニターした。また、0-2, 2-10, 10-20, 20-25 cm

Table.1 Experimental set up

Plot Number	8	7	6	5	4	3	2	1
Plot Name	N0	N8	N16	N4	N0	N8	N4	N16
Plot Name	Amount of Manure (g/m ²)		Amount of Cattle manure (g/m ²)					
			Nitrogen	Phos phorus	Potassium			
N16	2388.1	16.0	9.5	23.8				
N8	1194.0	8.0	4.7	11.9				
N4	597.0	4.0	2.4	5.9				
N0	0.0	0.0	0.0	0.0				

深の土を隔週で採取した。採取した土の全量 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ を、10 %KCl と蒸留水で抽出し、吸光光度計で測定した。N0-N16 区は2連で行い、平均値を各 N 区の値とした。同圃場の全量 $\text{NH}_4\text{-N}$ に対する溶存 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合 (永源, 2022) から 20-25 cm 深の溶存 $\text{NH}_4\text{-N}$ を算出し、土中水圧力、透水係数、20-25 cm 深の溶存 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ から窒素の下方浸透量を求めた。N0 区の無機態窒素量 ($\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の和) を土に由来含まれている有機物由来の無機態窒素量 $\text{Min-N}_{\text{Soil}}$ とし、牛糞堆肥施用区の無機態窒素量から引いた値を牛糞堆肥由来の無機態窒素量 Min-N_{CM} とした。同様に N0 区のイネの窒素吸収量、下方浸透量を土に由来含まれている有機物由来のイネの窒素吸収量 $\text{Uptake}_{\text{Soil}}$ 、下方浸透量 $\text{Leaching}_{\text{Soil}}$ とし、牛糞堆肥施用区のイネの窒素吸収量、下方浸透量から引いた値を牛糞堆肥由来のイネの窒素吸収量 $\text{Uptake}_{\text{CM}}$ 、下方浸透量 $\text{Leaching}_{\text{CM}}$ とした。

2. 結果

Fig.1 (a) に 5, 25 cm 深の日平均含水率と湛水深, (b) に 5, 25 cm 深の日平均地温を示す。4/4-4/13 にかけて日平均含水率は減少し、5, 25 cm 深はそれぞれ 0.16, 0.35 cm^3/cm^3 まで減少した。湛水を開始した 5/2 以降の日平均含水率は、両深度とも最大値を維持した。また、全期間の 5, 25 cm 深の日平均地温には違いがみられなかった。Fig.2 に N0, N16 区の 3/17-6/3 の $\text{NH}_4\text{-N}$ 分布を示す。両区画とも 4/30 にかけて増減は小さかったが、5/31 にかけて 0-10 cm 深で増加し、N16 区のほうが増加量が大きかった。代かき前後の 5/31-6/3 は全深度で増加した。代かきによる土壌攪乱と酸素供給が土壌微生物を活性化し、無機化速度を増加させたと考えられる。Fig.3 に N0, N16 区の窒素収支を示す。両図に 0-25 cm 深の $\text{Min-N}_{\text{Soil}}$, Min-N_{CM} , $\text{Uptake}_{\text{Soil}}$, $\text{Uptake}_{\text{CM}}$, $\text{Leaching}_{\text{Soil}}$, $\text{Leaching}_{\text{CM}}$ の積み上げを示す。湛水期間の

$\text{Min-N}_{\text{Soil}}$, Min-N_{CM} 増加量は、5/14-5/31 は 0.03, 0.05 $\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ に対し、代かき前後の 5/31-6/3 は 0.70, 0.16 $\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ だった。移植後から 6/20 にかけて Min-N_{CM} は 0.25 g/m^2 増加し、以降はイネの吸収によって減少した。 $\text{Uptake}_{\text{CM}}$ は移植後から 7/7 にかけて 1.37 g/m^2 増加し、7/24 にかけて 0.53 g/m^2 まで減少した。

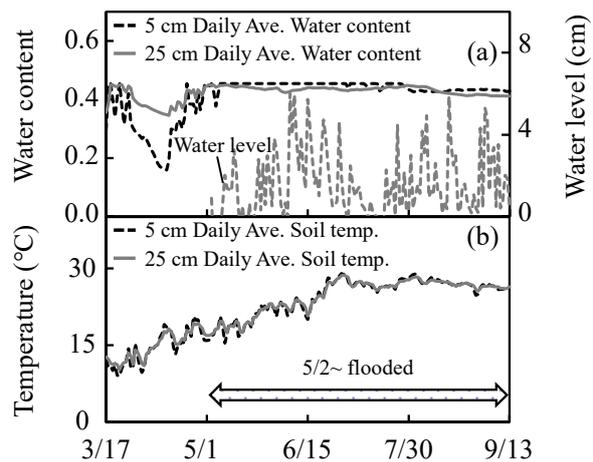


Fig.1 (a) Water content, Water level and (b) Temperature

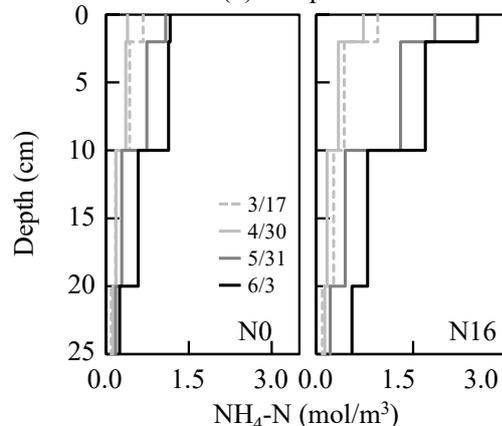


Fig.2 $\text{NH}_4\text{-N}$ profile in N0, N16 plot

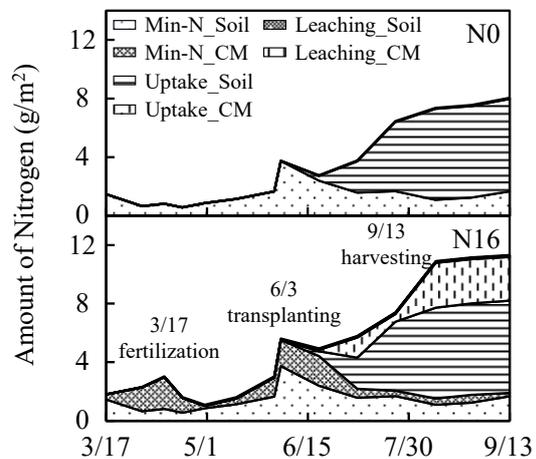


Fig.3 Nitrogen balance

8/11 は 3.06 g/m²まで増加し、収穫時期まで変化はなかった。9/13 の各施肥区の Uptake_CM は、N4-N0, N8-N0, N16-N0 区でそれぞれ 0.84, 3.09, 3.00 g/m²と、それぞれ施肥量の 20, 38, 19%だった。

IV 数値解析

1. 方法

深さ 100 cm を計算領域とし、採土深から 0-2, 2-10, 10-20, 20-30, 30-100 cm の 5 層とした。土中の水分移動はリチャーズ式を実測から得た水分特性を用い (Fig.4), 熱移動は熱移動式を用いることで圃場の水分・熱移動を再現した。溶質移動は移流分散方程式と一次分解反応式 (式 1) を用いて計算した。ここで、 k_{min} , k_{nit} , k_{den} に温度・水分依存性を与えた (Fig.5, 6)。 k_{min} の温度依存性は永源 (2022) より $T_{soil} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $k_{min} = 0.0001\text{ /d}$ と仮定した指数関数を与えた (式 3)。

$$k_{min}(T_{soil}) = 0.0001 \exp(B \cdot T_{soil}) \quad (\text{式 } 3)$$

B [$^{\circ}\text{C}$] は定数, T_{soil} [$^{\circ}\text{C}$] は地温である。 B を各区分で変えることで、土中の $\text{NH}_4\text{-N}$ と一致するようにした。水分依存性は (式 3) に乗じる関数 $f_m(\theta)$ とし、体積含水率 $\theta = 0.0, 0.23, 0.28, 0.45$ で $f_m(\theta) = 0, 1, 1, 0.6$ とした。 k_{nit} の温度・水分依存性はそれぞれ k_{nit} ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.30\text{ cm}^3/\text{cm}^3$) に乗じる関数 $f_n(T_{soil})$, $f_n(\theta)$ とし、 $f_n(T_{soil})$ は $T_{soil} = 15, 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $0.07, 1$, $f_n(\theta)$ は $\theta = 0.15, 0.30, 0.45$, で $0, 1, 0$ とした。 k_{den} の温度・水分依存性はそれぞれ k_{den} ($20\text{ }^{\circ}\text{C} <, 0.45\text{ cm}^3/\text{cm}^3$) に乗じる関数 $f_d(T_{soil})$, $f_d(\theta)$ とし、 $f_d(T_{soil})$ は $T_{soil} = 0, 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上で $0, 1$, $f_d(\theta)$ は $\theta = 0.27, 0.45$, で $0, 1$, とした。また、 k_{nit} ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.30\text{ cm}^3/\text{cm}^3$), k_{den} ($20\text{ }^{\circ}\text{C} <, 0.45\text{ cm}^3/\text{cm}^3$) は武藤ら (2019) 等を参考にそれぞれ $0.16, 0.1\text{ /d}$ とした。6/3 以降は 2 cm 深まで酸化層があるとし、酸化層の $f_n(\theta)$, $f_d(\theta)$ を $1, 0$ とした。計算期間を 3/17-5/30 と 6/3-9/13 に分けて行い、牛糞堆肥

由来の窒素について計算した。 θ , T_{soil} , $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の各期間の初期条件は実測に従い与えた。3/17 の $C_{org\text{-N}}$ は施肥量全量が含まれるとし、10 cm 深まで均一に与えた。6/3 の $C_{org\text{-N}}$ は次式で求め、10 cm 深まで均一に与えた (式 4)。

$$\begin{aligned} & 6/3 C_{org\text{-N}} \\ &= (3/17-5/31 \text{ に分解した } C_{org\text{-N}}) \quad (\text{式 } 4) \\ & \quad - (5/31-6/3 \text{ に増加した } C_{min\text{-N}}) \end{aligned}$$

$C_{min\text{-N}}$ は無機態窒素量 [g/m^2] である。根の吸水は Feddes モデルで表し、Singh et al., (2003) のイネのパラメータを与えた。根の窒素吸収量は受動吸収 Uptake_Pass. と能動吸収 Uptake_Act.

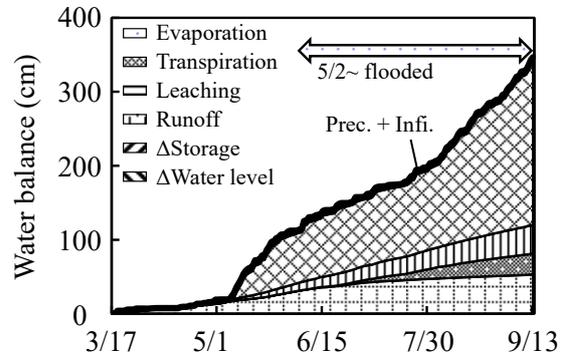


Fig.4 Calculate water balance

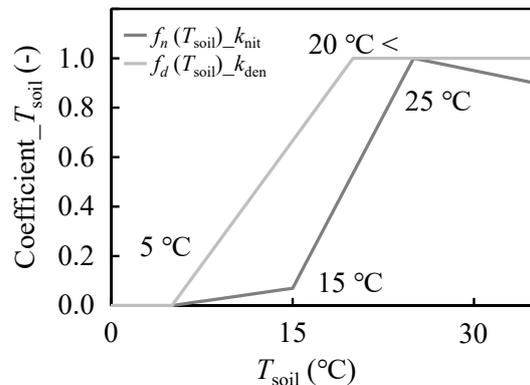


Fig.5 T_{soil} dependence of k_{nit} and k_{den}

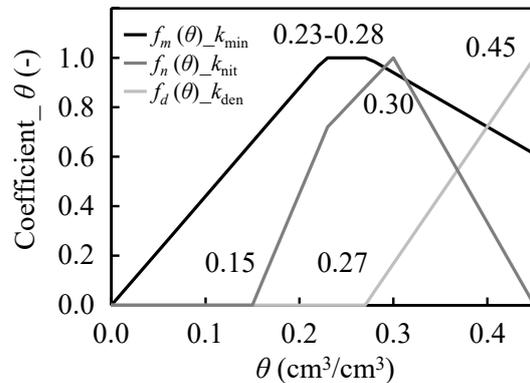


Fig.6 θ dependence of k_{min} , k_{nit} and k_{den}

の和とし、測定値と一致するよう表した。Uptake_Pass. は吸水速度と溶存 NH₄-N, NO₃-N の積とした。Uptake_Act. は溶存 NH₄-N のみあるとし、測定値から Uptake_Pass. を引くことで求めた。土中水の上端境界条件は気象データと Penman 式より与え、下端境界条件は一定圧力 ($h = -1$ cm) とした。熱の上端境界条件は 5 cm 深の地温 +1 °C とし、下端境界条件は一定温度 ($T_{soil} = 15$ °C) とした。溶質についてはフラックス境界条件を与えた。

2. 結果

Fig.7 に N16-N0 区の 4/20-5/31, 7/7-8/11 の NH₄-N 分布を示す。計算は実測を概ね表すことが出来た。Fig.8 に N16-N0 区の 0-25 cm 深の NH₄-N, NO₃-N, Uptake, Leaching の実測値と計算値、脱窒量の計算値を示す。NH₄-N の計算値は、8/11 以降で過大評価したものの、(式 3) のパラメータ B を代かき前後で分けることで概ね表せた (Table.2)。NO₃-N の計算値は、4/4-4/13 の乾燥期間で過小評価したが、6/3 以降は概ね表した。イネの窒素吸収量の計算値は、実測値とよく一致した。収穫時の Uptake_Pass. , Uptake_Act. はそれぞれ 0.23, 3.03 g/m² と、ほとんどが能動吸収だった。Leaching の計算値は、5/31, 9/13 でそれぞれ 0.05, 0.57 g/m² と栽培期間に多くなった。脱窒量の計算値は、5/31, 9/13 でそれぞれ 0.25, 1.25 g/m² と栽培期間に多くなった。湛水状態で土壌が嫌気化し、脱窒が促進されたと考えられる。Table.3 に各施肥区の施肥-収穫までの牛糞堆肥由来の窒素変化量を示す。本研究で与えた仮定が正しければ、無機化量は N4-N0, N8-N0, N16-N0 区でそれぞれ 2.41, 5.65, 6.05 g/m² と、それぞれ施肥量の 60, 71, 38% だった。下方浸透量は N4-N0, N8-N0, N16-N0 区でそれぞれ 0.19, 0.32, 0.54 g/m² と、施肥量に対し約 2-4% であることが分かった。脱窒量は N4-N0, N8-N0, N16-N0 区でそれぞれ 0.94, 1.44, 1.25 g/m² と、それぞれ施肥量の 23, 18, 8% となった。実際の現場では、施用

した有機物由来の無機化速度は施肥量によらず一定であると考えられるため、計算に用いたパラメータの感度解析やモデルの改善が今後の課題である。

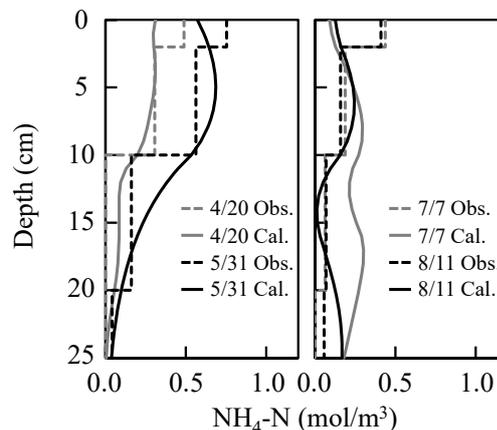


Fig.7 NH₄-N profile in N16-N0 plot

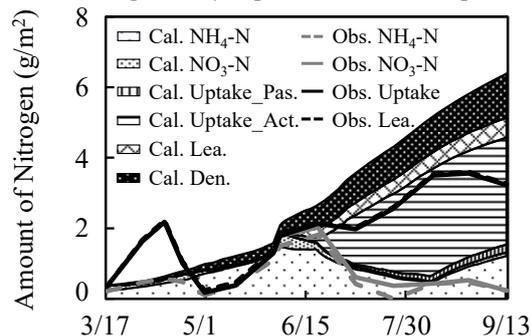


Fig.8 Calculate Nitrogen balance of N16-N0

Table.2 Change “ B ” of Equation 3 for each plot

	$f^{\circ}C$	3/17-5/31	5/31-6/3
N4-N0		0.18	0.16
N8-N0	B	0.16	0.19
N16-N0		0.15	0.19

Table.3 Nitrogen balance for each plot

	g/m ²	Mineralization	Soil Min-N	Leaching	Denitrification
N4-N0	Cal.	2.41	0.38	0.19	0.94
	Obs.		-0.02	0.04	
N8-N0	Cal.	5.65	0.76	0.32	1.44
	Obs.		-0.13	0.00	
N16-N0	Cal.	6.05	0.97	0.57	1.25
	Obs.		-0.03	0.04	

	g/m ²	Uptake_Pass.	Uptake_Act.
N4-N0	Cal.	0.12	0.78
	Obs.		0.84
N8-N0	Cal.	0.34	2.79
	Obs.		3.10
N16-N0	Cal.	0.23	3.03
	Obs.		2.99