

令和 5 年度

修士論文

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

三重大学 大学院生物資源学研究科  
共生環境学専攻 農業土木学専攻  
土壌圏システム学研究分野

522M218

井手 海盛

# 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 NH<sub>4</sub>-N、硝酸態窒素 NO<sub>3</sub>-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 N<sub>2</sub> 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。最適時期に適切な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 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-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、 $k_{\text{min}}$ 、 $k_{\text{nit}}$ 、 $k_{\text{den}}$  [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

NH<sub>4</sub>-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/m<sup>2</sup>] は NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N の土中変化量、 $N_{\text{吸収}}$ 、 $N_{\text{浸透}}$  [g/m<sup>2</sup>] は溶存 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-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 m<sup>2</sup> の水田 8 区画を準備した (Table1, Plot1-8)。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/m<sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> )	Amount of Cattle manure (g/m <sup>2</sup> )		
		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）を土に元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  $\text{Min-N}_{\text{CM}}$  とした。同様に N0 区のイネの窒素吸収量、下方浸透量を土に元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  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  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  $\text{Min-N}_{\text{Soil}}$ 、 $\text{Min-N}_{\text{CM}}$ 、 $\text{Uptake}_{\text{Soil}}$ 、 $\text{Uptake}_{\text{CM}}$ 、 $\text{Leaching}_{\text{Soil}}$ 、 $\text{Leaching}_{\text{CM}}$  の積み上げを示す。湛水期間の

$\text{Min-N}_{\text{Soil}}$ 、 $\text{Min-N}_{\text{CM}}$  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  $\text{Min-N}_{\text{CM}}$  は 0.25  $\text{g}/\text{m}^2$  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  $\text{g}/\text{m}^2$  増加し、7/24 にかけて 0.53  $\text{g}/\text{m}^2$  まで減少した。

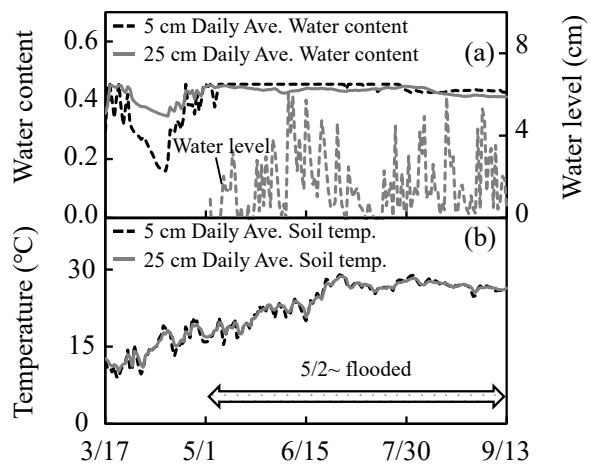


Fig.1 (a) Water content, Water level and (b) Temperature

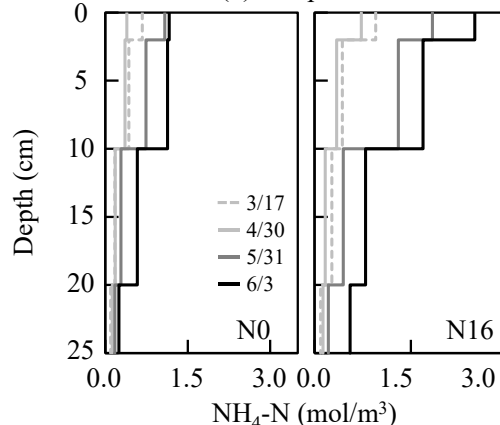


Fig.2  $\text{NH}_4\text{-N}$  profile in N0, N16 plot

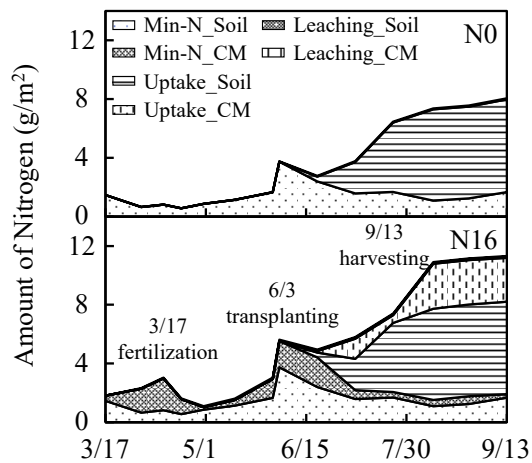


Fig.3 Nitrogen balance

8/11 は 3.06 g/m<sup>2</sup>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/m<sup>2</sup>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)。

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

$B\text{ [}^{\circ}\text{C]}$  は定数,  $T_{soil}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$  は地温である。 $B$  を各区画で変えることで、土中の NH<sub>4</sub>-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  $^{\circ}\text{C}$ , 0.30 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) 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  $^{\circ}\text{C}$  <, 0.45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) 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  $^{\circ}\text{C}$ , 0.30 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),  $k_{den}$  (20  $^{\circ}\text{C}$  <, 0.45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) は武藤ら (2019) 等を参考にそれぞれ 0.16, 0.1/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。 $\theta$ ,  $T_{soil}$ , NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N の各期間の初期条件は実測に従い与えた。3/17 の  $C_{org-N}$  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  $C_{org-N}$  は次式で求め、10 cm 深まで均一に与えた (式 4)。

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

$C_{min-N}$  は無機態窒素量 [g/m<sup>2</sup>] 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.

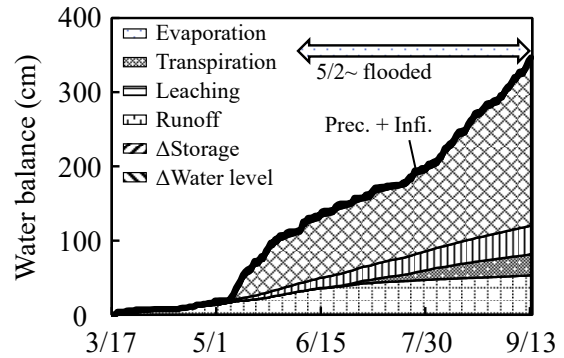


Fig.4 Calculate water balance

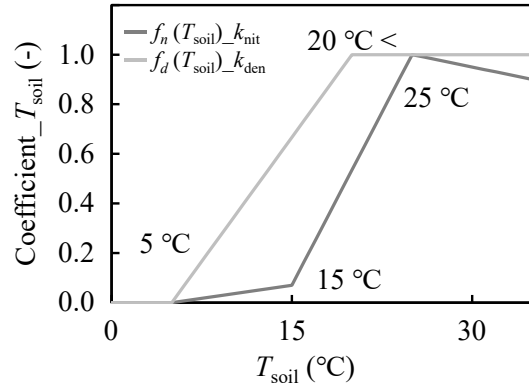


Fig.5  $T_{soil}$  dependence of  $k_{nit}$  and  $k_{den}$

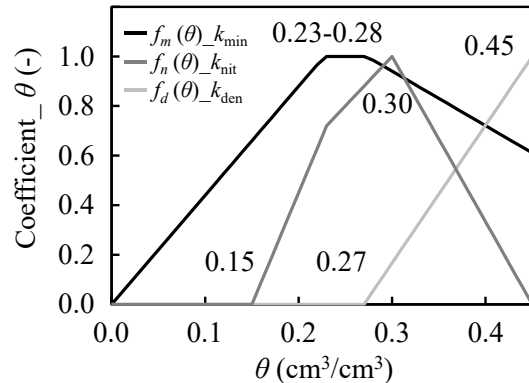


Fig.6  $\theta$  dependence of  $k_{min}$ ,  $k_{nit}$  and  $k_{den}$



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  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  の積とした。Uptake\_Act. は溶存  $\text{NH}_4\text{-N}$  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 ( $h=-1\text{ cm}$ ) とした。熱の上端境界条件は  $5\text{ cm}$  深の地温  $+1\text{ }^\circ\text{C}$  とし、下端境界条件は一定温度 ( $T_{\text{soil}}=15\text{ }^\circ\text{C}$ ) 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  $\text{NH}_4\text{-N}$  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  $0\text{-}25\text{ cm}$  深の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , Uptake, Leaching の実測値と計算値、脱窒量の計算値を示す。 $\text{NH}_4\text{-N}$  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)。 $\text{NO}_3\text{-N}$  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  $0.23, 3.03\text{ g/m}^2$  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  $0.05, 0.57\text{ g/m}^2$  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  $0.25, 1.25\text{ g/m}^2$  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  $2.41, 5.65, 6.05\text{ g/m}^2$  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  $0.19, 0.32, 0.54\text{ g/m}^2$  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  $0.94, 1.44, 1.25\text{ g/m}^2$  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

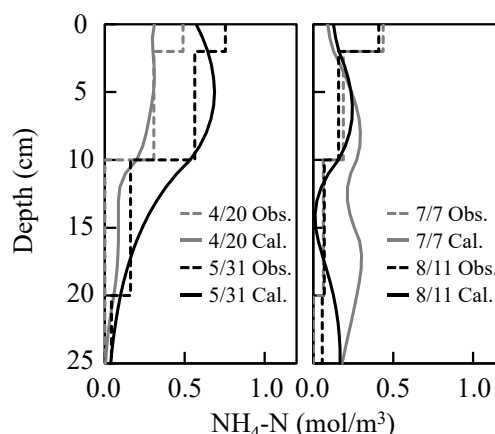


Fig.7  $\text{NH}_4\text{-N}$  profile in N16-N0 plot

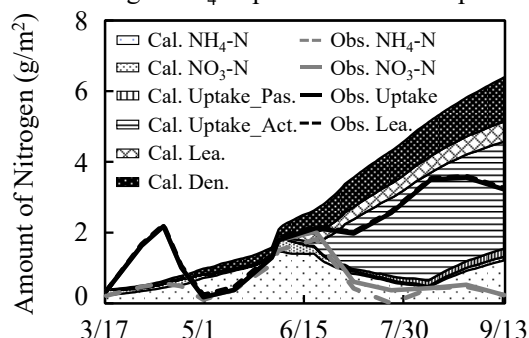


Fig.8 Calculate Nitrogen balance of N16-N0

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

	$f^\circ\text{C}$	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

	$\text{g/m}^2$	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	

	$\text{g/m}^2$	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	

## 目次

1 章	はじめに.....	1
2 章	水田土中の窒素循環について.....	4
2-1	土中の水分・熱・溶質移動.....	4
2-1-1	水分移動.....	4
2-1-2	熱移動.....	5
2-1-3	溶質移動.....	6
2-2	土中の窒素の形態変化.....	10
2-2-1	無機化, 有機化.....	10
2-2-2	硝化.....	11
2-2-3	揮発.....	12
2-2-4	脱窒.....	12
2-3	形態変化の反応速度式.....	14
2-3-1	無機化の反応速度式.....	14
2-3-2	一次分解反応式.....	16
2-3-3	無機化の温度・水分依存性.....	17
2-3-4	硝化の温度・水分依存性.....	24
2-4	イネ.....	26
2-4-1	栄養源.....	26
2-4-2	生育段階.....	27
2-4-3	水吸収.....	28
2-4-3-1	水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ .....	29
2-4-3-2	補填吸水モデル.....	30
2-4-4	可能蒸発速度と可能蒸散速度.....	32
2-4-5	溶質吸収.....	34
第 3 章	圃場実験による水田土中の窒素動態.....	37
3-1	調査地.....	37
3-1-1	圃場の施肥・管理方法.....	38
3-1-2	圃場試料の物理・化学性.....	41
3-2	圃場試料の採取・測定方法.....	44
3-2-1	土試料の採取.....	44

3-2-2	土試料の $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ の測定, 換算方法	45
3-2-3	イネ試料の採取	46
3-2-4	イネ試料の生育・収量調査と換算方法	47
3-3	圃場に設置したセンサー	50
3-3-1	気象センサー (ATMOS-41)	50
3-3-2	Em60 データロガー	51
3-3-3	土中センサー (TEROS12)	52
3-3-4	ZL6 データロガー	53
3-3-5	テンシオメータ (HG-2100AEL)	54
3-3-6	TDR センサー (Campbell Scientific CS650)	55
3-3-7	CR1000 データロガー	56
3-3-8	タイムラプスカメラ	56
3-4	センサーの測定結果	57
3-4-1	気象データ	57
3-4-2	土中データ	60
3-4-3	水深データ	62
3-5	イネの測定, 計算結果	64
3-5-1	生育調査	64
3-5-2	元素分析	66
3-5-3	窒素吸収量	68
3-5-4	収量調査	70
3-6	土試料の $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ 測定結果	72
3-6-1	$\text{NH}_4\text{-N}$ のプロファイル	72
3-6-2	$\text{NO}_3\text{-N}$ のプロファイル	77
3-7	土中の水分移動	82
3-7-1	可能蒸発散量 $ET_p$	82
3-7-2	可能蒸発量 $E_p$ と可能蒸散量 $T_p$	82
3-7-3	下方浸透水量	83
3-7-4	かんがい水量	85
3-7-5	水収支	87
3-8	土中の窒素移動	88
3-8-1	窒素の下方浸透量	88
3-8-2	窒素収支	90
3-9	まとめ	95
第4章	数値計算による水田土中の窒素動態	96

4-1 水分移動の数値計算 .....	96
4-1-1 初期条件と計算条件 .....	96
4-1-2 体積含水率 $\theta$ .....	100
4-1-3 水深 .....	102
4-1-4 実蒸発量 $E_a$ と可能蒸散量 $T_a$ .....	102
4-1-5 下方浸透水量 $J_w$ .....	103
4-1-6 表面流出量 $R$ .....	104
4-1-7 水収支 .....	105
4-2 熱移動の数値計算 .....	106
4-2-1 初期条件と計算条件 .....	106
4-2-2 地温 $T_{\text{soil}}$ .....	108
4-3 牛糞堆肥由来の窒素移動の数値計算 .....	110
4-3-1 計算条件 .....	110
4-3-1-1 吸着等温線モデル .....	111
4-3-1-2 無機化 .....	111
4-3-1-3 硝化 .....	113
4-3-1-4 脱窒 .....	114
4-3-1-5 イネの窒素吸収 .....	115
4-3-2 初期条件 .....	116
4-3-3 土中の $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ のプロファイル .....	118
4-3-3-1 $\text{NH}_4\text{-N}$ のプロファイル .....	118
4-3-3-2 $\text{NO}_3\text{-N}$ のプロファイル .....	121
4-3-4 窒素収支 .....	124
4-4 まとめ .....	132
5 章 おわりに .....	134
参考文献 .....	136
付録 .....	140

## 1章 はじめに

米は主食の1つであり、2021年時点で4割強の日本人が主食としている（農水省, 2022）。そして、イネを含めた植物は土壌中の窒素を養分として吸収する。窒素は、作物のカラダを作るたんぱく質、体内のさまざまな反応にかかわる酵素のタンパク質などの構成成分として、作物の生命維持に重要な役割を果たす。そのため、土壌中でよく不足しがちである（松中, 2018）。そこで、窒素を補うために肥料を投入する。

肥料は主に2種類あり、1つは人工的に作られた化学肥料、もう1つは家畜ふん堆肥や植物油かす等などの有機肥料がある。この2つの肥料に関して、農林水産省の「みどりの食料戦略システム」では、2050年までに化学肥料使用量を30%削減し、有機農業取組面積を全農地の25%まで拡大することを掲げている。そして、化学肥料の使用量削減には、堆肥等の有機資源を活用した施肥体系の確立と、現場実証や取組の拡大が必要であるとしている（農水省, 2021）。

ところで、圃場に施用された有機肥料中の有機態窒素は、無機化、硝化という微生物による反応を経て、アンモニア態窒素  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、硝酸態窒素  $\text{NO}_3\text{-N}$  へと分解され作物に吸収される。無機化、硝化は微生物による反応のため、土中の温度・水分量に左右される（2-2, 2-3 節参照）。それだけでなく、脱窒による  $\text{NO}_3\text{-N}$  の窒素ガス化や、土中水分流れによる溶存  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の下方浸透などによる窒素の損失がある。そのため、肥料中の有機態窒素が、いつ・どのくらい分解され  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  として土中に現れるかは、土中の温度・水分量や土中水分流れ次第である（図 1.1.1）。

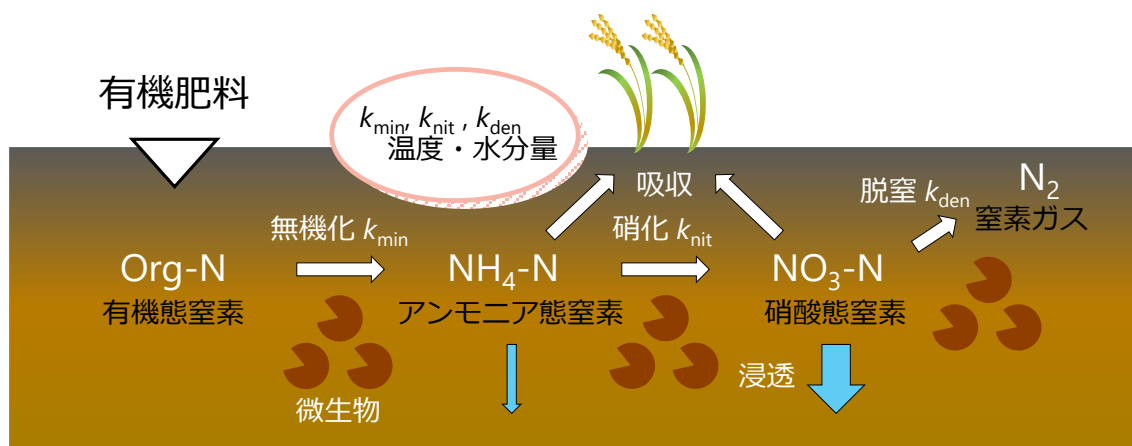


図 1.1.1 水田土中の窒素動態

無機化や硝化の反応速度、温度・水分依存に関する研究は、これまで多くされてきた。杉原ら（1986）の地温の影響を評価できる反応速度論的解析を用いた肥料中の有機態窒素無機化量の検討や（今野ら, 1996；進藤ら, 2002；末吉ら, 2004；石橋ら, 2014；大橋ら, 2017）、一次分解反応による硝化速度の温度・水分依存の検討がされてきた（中西, 2017；渡辺ら, 2019；

武藤ら, 2019)。しかし、これらの研究は室内実験を基に得た値であり、圃場に施用された有機肥料の経時変化無機化量・硝化量について検証された例は少ない。

永源（2022）は、米ぬかを肥料として水田に施用し、米ぬか由来の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  を無施肥区との差分によって測定した。そして、測定結果から予測モデルを作成し、翌年度の測定値に対する推定を行った。作成したモデルは、無機化を一次分解反応式で表せると仮定し、無機化の温度依存性を指数関数で表した。このとき、ある期間を一次分解反応による硝化を与えることで、無機態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  の和）を表した。しかし、無機化の水分依存性に関しては湛水、非湛水の 2 条件にしか分けておらず、硝化に関しては硝化速度定数を一定値で与えたため、温度・水分依存性を考慮できていない。

望月（2023）は、畑条件における有機肥料の無機化予測モデルに、温度・水分依存性を与えて無機態窒素測定値の再現を行った。窒素の溶脱を考慮することでより正確に予測できるとしているが、窒素の溶脱は化学肥料施肥区の無機態窒素増減率を基に決定している。そのため、土中水流れによる下方浸透、脱窒によるガス化の割合を明らかにできていない。

下方浸透や脱窒も考慮した水田圃場の無機態窒素予測については、数値計算で行われた研究例がある（Li et al., 2015 ; Chen et al., 2022）。しかし、尿素を肥料として用いた数値計算であり、無機化等に温度・水分依存性を与えられていない。

このように、これまで行われてきた有機肥料に関する研究や土中の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  を予測する研究には、

- (1) 室内実験から得られた無機化、硝化等の反応速度が、圃場に有機肥料を施用したときの有機肥料由来の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  変化量に適用できるか。
  - (2) 土中の温度・水分移動を考慮して、無機化、硝化、脱窒に温度・水分依存性を与える。
  - (3) 圃場に施用した有機肥料中の有機態窒素がいつ・どのくらい無機化、硝化、イネに吸収、下方浸透、脱窒等したのかを明らかにする。
- の 3 つ全てを満たす研究が行われていない。

そこで本研究では、牛糞堆肥を有機肥料として施用した水田土中の窒素動態を明らかにすることを目的とする。そのために、圃場実験において牛糞堆肥由来の窒素が、いつ・どのくらい土中にあるのか、イネに吸収されたのかを明らかにする。そして、硝化、脱窒を考慮して水分・熱・窒素移動の数値計算を行った。無機化、硝化、脱窒に温度・水分依存性を与えることで測定値を再現できるか検証し、牛糞堆肥由来の窒素の脱窒量、下方浸透量などの窒素動態がどのくらいなのかを明らかにする。

第 2 章では、水田土中での窒素の態の変化や、数値計算で用いる水分・熱・溶質移動および化学反応モデルの理論、イネの特徴や水分・溶質吸収に関する理論等を示す。

第 3 章では、異なる量の牛糞堆肥を肥料として水田に施用した圃場の、土中の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , イネの窒素吸収量の測定結果から、牛糞堆肥由来の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  の経時変化量や、施肥量に対するイネの窒素吸収増加量を明らかにする。

第4章では、圃場の水分・熱・窒素移動を数値計算する。無機化，硝化，脱窒に温度・水分依存性を与え、窒素移動の数値計算が測定値のプロファイルや深さ 0-25 cm の窒素収支を再現できるか検証する。そして、牛糞堆肥由来の窒素の脱窒量，下方浸透量などの窒素動態を明らかにする。

## 2 章 水田土中の窒素循環について

水田に施用された有機肥料に含まれる有機態窒素は、土壤微生物の働きによって態が変化しイネに吸収される。また、土中では水分・熱・溶質の移動があり、これらは土中の窒素の態の変化に影響する。そこで本章では、土中での窒素の態の変化や、水分・熱・溶質移動および化学反応モデルの理論、イネの特徴やイネの水分・溶質吸収の理論について示す。

本研究では、4 章で示す数値計算、すなわち土中における水分・熱・溶質の移動および化学反応の解析に、不飽和水分移動汎用プログラム HYDRUS-1D と地球科学反応プログラム PhreeqC を連結したプログラムである HP1 を用いた。HP1 は、2 つのプログラムを行き来し、HYDRUS-1D の部分で 1 次元土中の水分・熱・溶質移動を行い、PhreeqC の部分で物質の化学反応やそれにとまなうイオン交換を計算する。

そこで、2.1 節では主に HP1 で用いられている水分・熱・溶質移動式および化学反応モデルを、2.2 節では土中での窒素の態の変化を、2.3 節では態の変化の反応速度式や、態の変化と土中の温度・水分との関わりについて、2.4 節ではイネの特徴や、HP1 で用いられているイネの水分・溶質吸収について示す。

### 2-1 土中の水分・熱・溶質移動

この節では、主に HP1 で用いられている土中の水分・熱・溶質移動モデルおよび化学反応モデルをそれぞれ示す。

#### 2-1-1 水分移動

鉛直 1 次元の不飽和土中の水分移動は、土中の全水頭 ( $h + z$ ) の勾配により生じ、次式のバッキンガム-ダルシー則で表すことができる (Jury and Horton, 2006)。

$$J_w = -K(h) \frac{\partial(h+z)}{\partial z} = -K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{式 2.1.1}$$

$h$  [cm] は土中水の圧力水頭、 $z$  [cm] は地表面を 0 とする上向き正の空間座標および土中水の重力水頭、 $K(h)$  [cm/d] は不飽和透水係数、 $J_w$  [cm/d] は鉛直方向の水分フラックスである。ここで、水頭とは単位重量当たりのエネルギーで長さの次元をもつ。また、バッキンガム-ダルシー式を水保存則と結合させることで、リチャーズ式が導かれる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad \text{式 2.1.2}$$

ここで、 $\theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] は体積含水率、 $t$  [d] は時間、 $S$  は植物根による吸水などを示す吸い込み項である。拡散方程式であるリチャーズ式に、適切な初期条件・境界条件 (斎藤ら, 2006)



を与えて解くことで、体積含水率や土中水圧力の分布など、不飽和土中の水分移動を予測することができる。また吸水項  $S$  について、植物根の吸水モデル (Feddes et al., 1978 ; van Genuchten, 1987) と組み合わせて解くことで、根の吸水による水分移動を予測することも可能である。植物根の吸水モデルについては、2-4-3 節で示す。

## 2-1-2 熱移動

水蒸気の拡散が輸送に及ぼす影響を無視すると、鉛直 1 次元の熱伝導は次の移流拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial C_p(\theta)T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_w \frac{\partial J_w T}{\partial z} - C_w S T \quad \text{式 2.1.3}$$

ここで、 $C_p$ ,  $C_w$  [ $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ] はそれぞれ土と水の体積熱容量、 $T$  [ $\text{K}$ ] は温度、 $\lambda(\theta)$  [ $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ ] は土のみかけの熱伝導率である。右辺の第 1 項は熱伝導による熱の流れ、第 2 項は液状水移動による水の顕熱輸送、第 3 項は根の吸収に伴う水蒸気拡散による顕熱輸送である。ここでは、水蒸気拡散による潜熱輸送は考慮していない。

土の体積熱容量  $C_p$  は次式で表される。

$$C_p = C_s \theta_{\text{solid}} + C_w \theta + C_v \theta_a \quad \text{式 2.1.4}$$

ここで、 $C_s$ ,  $C_v$  [ $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ] はそれぞれ固相と気相の体積熱容量、 $\theta_{\text{solid}}$ ,  $\theta_a$  [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] はそれぞれ全体積(固相, 液相, 気相の和)における固相と気相の体積割合である。

$\lambda(\theta)$  は流れのない状態での熱伝導率  $\lambda_0(\theta)$  [ $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ ] と速度の線形関数であるマクロ分散率を組み合わせた式で表される (de Marasily, 1986)。

$$\lambda(\theta) = \lambda_0(\theta) + \beta_1 C_w |J_w| \quad \text{式 2.1.5}$$

ここで、 $\beta_1$  [ $\text{m}$ ] は熱分散率であり、 $\lambda_0$  は次式で表される (Chung and Horton, 1987)。

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2 \theta + b_3 \theta^{0.5} \quad \text{式 2.1.6}$$

ここで、 $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  [ $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}) = \text{kg} \cdot \text{m}/(\text{s}^3 \cdot \text{K})$ ] は定数で、Loam では  $b_1=0.243$ ,  $b_2=0.393$ ,  $b_3=1.53$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}/(\text{s}^3 \cdot \text{K})$ ] である。

### 2-1-3 溶質移動

化学物質が溶存相，吸着相，気相に存在するとき、全化学物質の濃度  $C_T$  [mol/cm<sup>3</sup>] は次式で表される (Jury and Horton, 2006)。

$$C_T = \rho_b C_a + \theta C_l + \theta_a C_g \quad \text{式 2.1.7}$$

ここで、 $C_a$  [mol/g<sub>soil</sub>] は溶質の吸着濃度， $C_l$  [mol/cm<sup>3</sup>] は溶質の溶存濃度， $C_g$  [mol/cm<sup>3</sup>] は気相中の溶質濃度， $\rho_b$  [g<sub>soil</sub>/cm<sup>3</sup>] は乾燥密度である。

鉛直 1 次元の化学物質移動式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(C_T) = & \frac{\partial}{\partial z} \left( D_g^s \frac{\partial C_g}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_e \frac{\partial C_l}{\partial z} \right) \\ & - \frac{\partial}{\partial z} (J_w C_l) - (\rho_b r_a + \theta r_l + \theta_a r_g) \end{aligned} \quad \text{式 2.1.8}$$

ここで、 $D_g^s$  [cm<sup>2</sup>/d]， $D_e$  [cm<sup>2</sup>/d] はそれぞれ土中のガス拡散係数，溶質の有効拡散分散係数， $r_a$  [mol/(g<sub>soil</sub>・d)]， $r_l$  [mol/(cm<sup>3</sup>・d)]， $r_g$  [mol/(cm<sup>3</sup>・d)] はそれぞれ溶質の吸着態，溶質の溶存態，気相中の溶質の反応速度である。右辺の第 1 項は気相中のガス拡散，第 2 項は液相中の溶質の拡散・分散，第 3 項は液相中の溶質の移流，第 4 項は化学物質の反応項である。

$D_e$  は水理学的分散係数  $D_{lh}$  [cm<sup>2</sup>/d] と拡散係数  $D_l^s$  [cm<sup>2</sup>/d] の和である。 $D_{lh}$  は間隙流速  $v$  [cm/d] と分散長  $\lambda$  [cm] の積で与えられ、 $D_l^s$  は水中の相互拡散係数  $D_l^w$  [-] と液相屈曲度  $\tau_w$  [-] の積で表される。 $\tau_w$  は Millington and Quirk モデルで与えられる (式 2.1.9)。

$$\begin{aligned} D_e &= D_{lh} + D_l^s \\ &= \lambda v + \tau_w D_l^w \\ &= \lambda \frac{J_w}{\theta} + \frac{\theta^{\frac{7}{3}}}{\theta_s^2} D_l^w \end{aligned} \quad \text{式 2.1.9}$$

蒸気層が無視できる化学物質の場合、式 2.1.7，2.1.8 は  $C_g$ ， $r_g$  をゼロとして式 2.1.10，2.1.11 (移流分散方程式) のように単純化できる。

$$C_T = \rho_b C_a + \theta C_l \quad \text{式 2.1.10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_T) = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_e \frac{\partial C_l}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (J_w C_l) - (\rho_b r_a + \theta r_l) \quad \text{式 2.1.11}$$

移流分散方程式の右辺第 3 項の  $r_a$ ,  $r_l$  は溶存態, 吸着態に関わらず同じ反応速度の値であると仮定した。反応速度を表す式は 2-3 節に示す。

式 2.1.10 の  $C_T$  は、溶質の吸着量と溶存量を合わせた全量である。溶質の全量に対する吸着量および溶存量の割合は、吸着特性のモデル（吸着等温線モデルもしくはイオン交換モデル）で表される。本研究では吸着等温線モデルを用いたが、2 つのモデルについて次に説明する。

### 〈吸着等温線モデル〉

吸着等温線は、溶質間の相互作用を考慮せず、任意の溶質ごとに単独で溶質の吸着濃度と溶存濃度を求める吸着特性モデルである。最も単純な吸着の理論式は次のラングミュア式で表される。

$$C_a = \frac{KQC_l}{1 + KC_l} \quad \text{式 2.1.12}$$

ここで、 $K [\text{cm}^3/\text{mol}]$  は吸着定数、 $Q [\text{mol}/\text{g}_{\text{soil}}]$  は最大吸着量である。ラングミュアの吸着式は、吸着サイトが均質な粘土鉱物にはよく一致することが報告されているが、土壌の複雑な吸着には適合しないことが多い（石黒, 2019）。

そのため、実験式としてよくフロインドリッヒ式が用いられている。これは実験式だが、多種類の吸着サイトに分布関数を用いてラングミュア式を適用し、近似的に導くことが出来る（石黒, 2018）。

$$C_a = K_f C_l^\beta \quad \text{式 2.1.13}$$

ここで、 $K_f [\text{cm}^3/\text{g}_{\text{soil}}]$ ,  $\beta [-]$  は定数であり、 $\beta \leq 1$  である。また、 $\beta=1$  のとき次式で表せられ、線形吸着等温線とよばれる。

$$C_a = K_d C_l \quad \text{式 2.1.14}$$

ここで、 $K_d [\text{cm}^3/\text{g}_{\text{soil}}]$  は分配定数である。本研究では線形吸着等温線の式 2.1.14 を用いた。

### 〈イオン交換モデル〉

イオン交換モデルは、土の陽イオン交換容量 CEC に対し、イオン間の吸着平衡式を土中の主要なイオンすべてについて連立し、イオンの吸着濃度と溶質濃度を求める。イオン間の交換は、可逆的に行われると仮定し化学平衡式で表す。一例として  $\text{NH}_4^+$  と  $\text{K}^+$  の交換につい

て考える。

土粒子の吸着サイト  $X^-$  に  $Na^+$  が吸着しており、 $K^+$  溶液を流した時の反応は次の化学平衡式で表される。

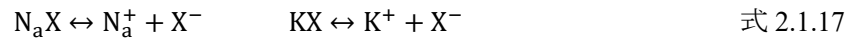


このときの吸着平衡定数  $K_{Na/K}$  は次式で表される。

$$\frac{[KX][Na^+]}{[NaX][K^+]} = K_{Na/K} \quad \text{式 2.1.16}$$

吸着平衡定数は、値が高いほど順反応が進展しやすいことを意味する。すなわち上式の場合、 $K_{Na/K}$  が大きいほど  $K^+$  の方が  $Na^+$  より吸着されやすくなる。

ここで、 $X^-$  と各イオンの吸着平衡定数について考える。両者の交換は、次の化学平衡式で表される。



このときのそれぞれの吸着平衡定数  $K_{Na}$ 、 $K_K$  は次式で表される。

$$\frac{[Na^+][X^-]}{[NaX]} = K_{Na} \quad \frac{[K^+][X^-]}{[KX]} = K_K \quad \text{式 2.1.18}$$

式 2.1.16, 2.1.18 より次式が導かれる。

$$\frac{[KX][Na^+]}{[NaX][K^+]} = K_{Na/K} = \frac{K_{Na}}{K_K} \quad \text{式 2.1.19}$$

以上より、各イオンの吸着平衡定数がわかれば、イオン間の吸着平衡定数を決定でき、イオンの吸着濃度と溶質濃度を求めることが出来る。

各イオンの平衡定数  $K_i$  には、次式 2.1.20~2.1.25 に示す固有値を与える。固有値は PhreeqC の database を同じ値を与えている。これらの式と、吸着サイト  $X^-$  の総量  $X_{total}$  と各吸着イオンとの関係を表す式 2.1.26 を連立してイオン間の吸着平衡定数を決定した。

$$\frac{[\text{NaX}]}{[\text{Na}^+][\text{X}^-]} = K_{\text{Na}} \quad \log K_{\text{Na}} = 0 \quad \text{式 2.1.20}$$

$$\frac{[\text{KX}]}{[\text{K}^+][\text{X}^-]} = K_{\text{K}} \quad \log K_{\text{K}} = 0.7 \quad \text{式 2.1.21}$$

$$\frac{[\text{NH}_4\text{X}]}{[\text{NH}_4^+][\text{X}^-]} = K_{\text{NH}_4} \quad \log K_{\text{NH}_4} = 0.6 \quad \text{式 2.1.22}$$

$$\frac{[\text{MgX}_2]}{[\text{Mg}^{2+}][\text{X}^-]^2} = K_{\text{Mg}} \quad \log K_{\text{Mg}} = 0.6 \quad \text{式 2.1.23}$$

$$\frac{[\text{CaX}_2]}{[\text{Ca}^{2+}][\text{X}^-]^2} = K_{\text{Ca}} \quad \log K_{\text{Ca}} = 0.8 \quad \text{式 2.1.24}$$

$$\frac{[\text{HX}]}{[\text{H}^+][\text{X}^-]} = K_{\text{H}} \quad \log K_{\text{H}} = 1 \quad \text{式 2.1.25}$$

$$X_{\text{total}} = [\text{NaX}] + [\text{KX}] + [\text{NH}_4\text{X}] + 2[\text{MgX}_2] + 2[\text{CaX}_2] + [\text{HX}] \quad \text{式 2.1.26}$$

ここで  $X_{\text{total}}$  [ $\text{mol}/\text{cm}^3$ ]は、土の陽イオン交換容量  $\text{CEC}$  [ $\text{mol}/\text{g}_{\text{soil}} = \text{me}/\text{g}_{\text{soil}}$ ]と乾燥密度  $\rho_b$  [ $\text{g}_{\text{soil}}/\text{cm}^3$ ]を用い、次の式で求めることが出来る。

$$X_{\text{total}} = \text{CEC} \times \rho_b \quad \text{式 2.1.27}$$

このように、イオン交換モデルでは、すべてのイオンが互いに作用し吸着量が決定される。任意のイオンの溶存濃度に対する吸着量は、他のイオンの挙動により変化する。

## 2-2 土中の窒素の形態変化

土中では、有機態窒素からアンモニア態窒素  $\text{NH}_4\text{-N}$  への無機化や、その逆の有機化、 $\text{NH}_4^+$ の揮発や硝化、硝酸態窒素  $\text{NO}_3\text{-N}$  の脱窒などが行われる。この節では、土中微生物による窒素の態の変化についての詳細や、反応を表す式を示す。また、土中微生物による反応のため、土中の温度や水分量との関係性について示す。

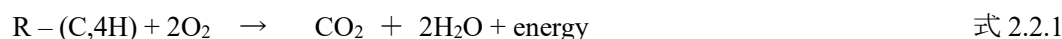
### 2-2-1 無機化，有機化

土中の有機物に含まれる有機態窒素  $\text{Org-N}$  は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  になる無機化と、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が  $\text{Org-N}$  になる有機化とよばれる反応が生じる。これらの反応は土壌微生物と密接に関わっている。

土壌微生物は栄養物の収支を必要とし、その栄養物から細胞を構築したりエネルギーを抽出したりしている。大半の土壌生物は必要不可欠な有機化合物を構築するための炭素  $\text{C}$  と、生きるためのエネルギーを得るために炭素物質を代謝している。しかし、どの生き物も  $\text{C}$  だけでは増殖したり成長したりできず、アミノ酸，酵素，DNA のような窒素  $\text{N}$  を含む細胞の構成要素を合成するために、 $\text{N}$  も得る必要がある (Brady and Weil, 2017)。

以上のことから、土壌微生物は  $\text{C}$  と  $\text{N}$  を取り込む必要がある。そして、これらは有機物を分解することで得ることが出来る。

土壌有機物の元になるのは植物組織であり、土壌に蓄積される有機物の量は、植物の純生産性の関数であるとも言える。十分に好気的な土壌では、植物残渣に含まれる全ての有機化合物が酸化される。植物体の有機断片は主に  $\text{C}$  と水素  $\text{H}$  で構成されているため、有機物の土壌微生物による反応は次のような酸化反応で表すことができる (Brady and Weil, 2017)。



ここで、 $\text{R}$  はアミノ基が結合している有機分子の部分を表す。これは全体的な反応のため、多くの中間過程を省いている。しかし、この基本的な反応で土壌中の有機物分解が酸化反応であり、大部分が酸素消費と  $\text{CO}_2$  放出であることがわかる。

一方で有機化合物にはタンパク質があり、約 16% が  $\text{N}$  からなっている。これも土壌微生物によって分解され、 $\text{CO}_2$  や水だけでなく、グリシン ( $\text{CH}_2 \text{NH}_2 \text{COOH}$ ) やシステイン ( $\text{CH}_2 \text{HSCHNH}_2 \text{COOH}$ ) などのアミノ酸も生成する。そして、これらの  $\text{N}$  及び硫化化合物はアミノ基 ( $\text{R-NH}_2$ ) 及び硫化物基 ( $\text{R-S}$ ) に分解される。アミノ基は次の加水分解によってアンモニア  $\text{NH}_4^+$  が生成される (Brady and Weil, 2017)。



このように、土壌微生物は有機物を分解することで C を、タンパク質を分解することで NH<sub>4</sub>-N を得ることが出来る。

無機化と有機化は土壌微生物が関与しているため、優先度は土壌微生物の C/N と有機物の C/N の関係を考えることで理解できる。

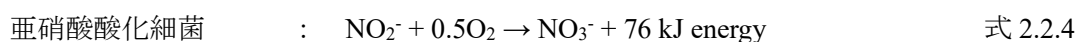
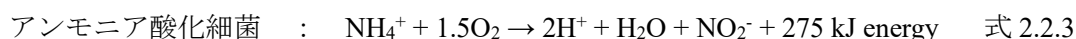
土壌微生物は平均的にみると、C の 1/8 の N を細胞に取り込む（すなわち土壌微生物の C/N が平均 8）。生物が代謝した C の約 1/3 が細胞に取り込まれ、残り 2/3 は呼吸で CO<sub>2</sub> として失われる。そのため、土壌微生物は土壌有機物中の 24 g の C に対し、1 g の N を得る必要がある（Brady and Weil, 2017）。すなわち、C/N が 25 以上の有機物が投入されると、微生物がこれを餌として食べ、足りない N は土中から補給して自身の体を合成する必要がある。このとき、土中の NH<sub>4</sub>-N が使用され微生物のタンパク質となる。これが有機化である。一般に、有機物分解で働く微生物の C/N は、細菌で 5、放線菌で 6、菌類で 10 と言われている（Brady and Weil, 2017）。よって、C/N が 16-30 以上の有機物を土中に投入した際は有機化が生じる可能性がある。

また、微生物に取り込まれた N は、微生物に分解されたりして再び土中で利用されるが、C は式 2.2.1 から呼吸により CO<sub>2</sub> として消失していく。そのため次第に C/N が低くなり、土中に NH<sub>4</sub><sup>+</sup> が放出され始める。これが無機化である。

本研究では、有機化と無機化を分けずに見かけの無機化とした（以下、無機化）。また、無機化の反応速度式、温度・水分依存性については 2-3 節で示す。

## 2-2-2 硝化

硝化とは、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> が酸化され NO<sub>2</sub><sup>-</sup> を経て NO<sub>3</sub><sup>-</sup> に形態変化する反応である。硝化を行う細菌は、主に絶対好気性の独立栄養細菌である。これらは 2 種類あり、1 つは NH<sub>4</sub><sup>+</sup> を酸化し NO<sub>2</sub><sup>-</sup> にするアンモニア酸化細菌（主に *Nitrosomonas* 属）、もう 1 つは NO<sub>2</sub><sup>-</sup> を酸化し NO<sub>3</sub><sup>-</sup> にする亜硝酸酸化細菌（主に *Nitrobacter* 属）である。以下、この 2 種をまとめて硝化細菌とする。硝化細菌は、次式のように酸化反応を起こし、その過程でエネルギーを得る（Brady and Weil, 2017）。



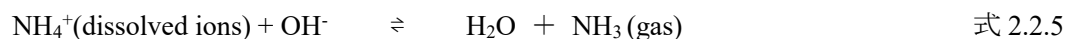
NO<sub>2</sub>-N は植物に有害であるが、ほとんど土壌に蓄積することはない（Brady and Weil, 2017）。そのため、本研究では硝化によって NO<sub>3</sub>-N のみ生じるとした。また、硝化の反応速度式、温度・水分依存性については 2-3 節で示す。

水田ではイネの栽培中、土壌を湛水にする。すると、湛水当初の最表層（厚さ数 mm-2 cm）

は、還元状態になる。しかし、日数の経過に伴い土中の有機物分解量が減少し、式 2.2.1 より酸素消費量が減少する。その結果、田面水中に溶け込む大気中の酸素や田面水中に生息する藻類から発生する酸素生成量が、有機物分解による酸素消費量を卓越するため、最表層で酸素の層（酸化層）が蓄積される。一方で、最表層の下層の作土層（-20 cm）は還元状態におかれた還元層のままになる（松中, 2018）。そのため、湛水下にある水田の最表層では硝化が起き、その下層の作土層では硝化が起きないと考えることが出来る。

### 2-2-3 揮発

土中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  の一部は、 $\text{NH}_3$  ガスとして大気に放出されることがある。これを、アンモニア揮散という。次の化学平衡式が右に動いたとき、揮散する（Brady and Weil, 2017）。

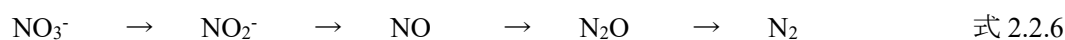


化学平衡式より 2 つのことがわかる。1 つは  $\text{OH}^-$  濃度が高い場合、すなわち pH が高い場合は  $\text{NH}_3$  ガスが大気へ放出されることである。もう 1 つは  $\text{NH}_3$  ガスや水が多い場合は反応が左に進み、pH が上昇することである。苗木ら（2007）は、土壌 pH が高いとアンモニア揮散率が高いという報告をしている。また、 $\text{NH}_4^+$  濃度が高いほどアンモニア揮散率が指数関数的に高くなるという報告（Rochette et al., 2013）や、温度が高いほどアンモニア揮散率が高いという報告もある（松中・千徳, 2002）。これらの反応が生じることで、土中窒素の損失だけでなく、大気に揮散した  $\text{NH}_3$  ガスが大気中の硫酸基と結合しより強い酸性雨が発生する。

一方、アンモニア揮発は肥料を表面に撒くよりも数 cm すきこむことで 25-75 %削減できる（Brady and Weil, 2017）。また、灌漑や雨水によって表面に施用された肥料が土中へ浸潤し、アンモニア揮散を抑えることができる（Holcomb et al., 2011）。本研究では、肥料として使用した牛糞堆肥を施肥後にすき込んだこと、灌漑による湛水条件下であったことから、アンモニア揮発による  $\text{NH}_4\text{-N}$  の損失は無視できると仮定した。

### 2-2-4 脱窒

生成された  $\text{NO}_3\text{-N}$  や  $\text{NO}_2\text{-N}$  などの窒素酸化物が、 $\text{N}_2$  や  $\text{N}_2\text{O}$  といったガス態窒素に還元される現象を脱窒という。 $\text{N}_2$  や  $\text{N}_2\text{O}$  は気体であるため、ほとんど大気へ放出される。脱窒は、嫌気性細菌である脱窒菌によって引き起こされる嫌気呼吸である。脱窒による窒素の形態変化は次のように表される。



湛水下の水田では、酸化層で  $\text{NO}_3^-$  が生成される。 $\text{NO}_3^-$  は陰イオンのため土壌の負電荷と反



発し下層の作土層に流れる。作土層は還元層のため、ここで脱窒がおこり上式のように  $\text{N}_2$  ガスまで還元される(松中, 2018)。そのため、湛水下にある水田の最表層では脱窒が起きず、その下層の作土層では脱窒が起きると考えることが出来る。

脱窒の温度依存性は、5 °C等の低温でも緩やかな脱窒がみられ (Bremner et al., 1958 ; Brady and Weil, 2017)、最適温度は 20-30 °Cや (Brady and Weil, 2017 ; 松山ら, 1982)、60 °Cといった報告がある (Bremner et al., 1958)。

脱窒の水分依存性は、土壌水分が最大容水量の 60 %以下だと脱窒速度は著しく小さく (Bremner et al., 1958)、飽和で最大になるという報告がある (Brady and Weil, 2017)。

## 2-3 形態変化の反応速度式

2-2 節で示したように、土中の窒素の形態変化は微生物による反応である。そして、土中の温度は時々刻々と変化しており、温度は生物活性に影響を与える。そのため、形態変化の反応速度式は、土中の温度・水分量に依存する。ここでは、形態変化の反応速度式を示すと共に、温度・水分依存について示す。

### 2-3-1 無機化の反応速度式

一般的に、硝化、脱窒の反応速度式は一次分解反応式が用いられている。しかし、無機化は分解元である有機態窒素の分子量が、硝化の  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、脱窒の  $\text{NO}_3\text{-N}$  に比べて大きく、無機化の逆反応の有機化も影響する。そのため、無機化の反応速度式として、単純型モデル（一次分解反応式）、単純平行型モデル、有機化・無機化平行型モデル（杉原ら, 1986）がある。ここでは、それぞれの反応について説明する。

#### 〈単純型モデル〉

単純型モデルは、無機化速度定数  $k_{\min}$  [1/d]を用い、有機態窒素  $C_{\text{org-N}}$  からアンモニア態窒素  $C_{\text{NH}_4\text{-N}}$  が生成される不可逆一次反応モデルとして、次式で表される。

$$\frac{d}{dt} C_{\text{NH}_4\text{-N}} = k_{\min} C_{\text{org-N}} \quad \text{式 2.3.1}$$

上式を解くと、 $t = 0$  のとき  $C_{\text{org-N}} = C_{\text{org-N}_0}$ 、 $C_{\text{NH}_4\text{-N}} = C_{\text{NH}_4\text{-N}_0}$  として次式になる（図 2.3.1）。

$$C_{\text{NH}_4\text{-N}} = C_{\text{org-N}_0} \{1 - \exp(-k_{\min} t)\} + C_{\text{NH}_4\text{-N}_0} \quad \text{式 2.3.2}$$

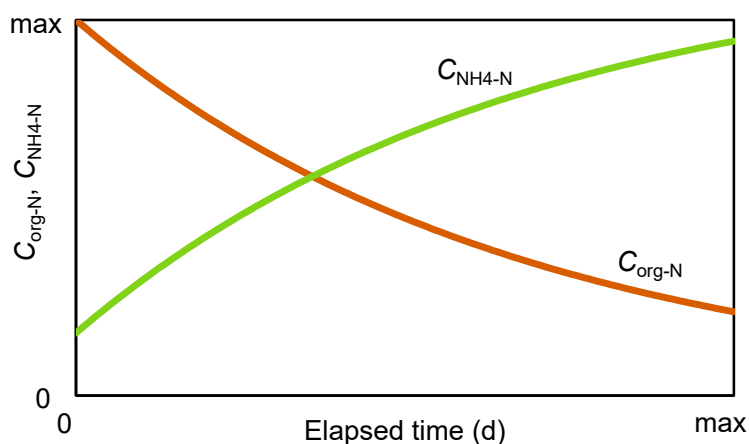


図 2.3.1 単純型モデルの概念図

### 〈単純平行型モデル〉

単純平行型モデルは、有機態窒素を分解の速いプール  $C^1_{\text{org-N}}$ 、分解の遅いプール  $C^2_{\text{org-N}}$  と分け、それぞれ独立して無機化する不可逆一次反応モデルとして、次式で表される。

$$\frac{d}{dt}C_{\text{NH}_4\text{-N}} = k^1_{\text{min}}C^1_{\text{org-N}} + k^2_{\text{min}}C^2_{\text{org-N}} \quad \text{式 2.3.3}$$

ここで、 $k^1_{\text{min}}$ 、 $k^2_{\text{min}}$  [d]はそれぞれ  $C^1_{\text{org-N}}$ 、 $C^2_{\text{org-N}}$  の無機化速度定数である。  
上式を解くと、次式になる。

$$C_{\text{NH}_4\text{-N}} = C^1_{\text{org-N}_0}\{1 - \exp(-k^1_{\text{min}}t)\} + C^2_{\text{org-N}_0}\{1 - \exp(-k^2_{\text{min}}t)\} + C_{\text{NH}_4\text{-N}_0} \quad \text{式 2.3.4}$$

上式において、 $C^1_{\text{org-N}} < C^2_{\text{org-N}}$ 、 $k^1_{\text{min}} < k^2_{\text{min}}$  のときの概念図を次に示す。

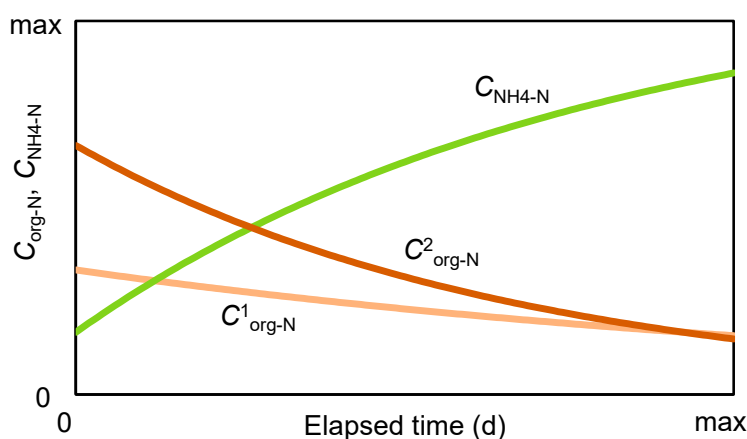


図 2.3.2 単純平行型モデルの概念図

### 〈有機化・無機化平行型モデル〉

有機化・無機化平行型モデルは、単純型モデルの無機化に有機化を加え、それぞれ独立して進行する不可逆一次反応モデルとして、次式で表される。

$$\frac{d}{dt}C_{\text{NH}_4\text{-N}} = k_{\text{min}}C_{\text{org-N}} - k_{\text{imm}}C_{\text{imm}} \quad \text{式 2.3.5}$$

ここで、 $k_{\text{imm}}$  [d]は有機化速度定数、 $C_{\text{imm}}$  は有機化された  $\text{NH}_4\text{-N}$  である。  
上式を解くと、 $C_{\text{imm}}$  の最大値を  $C_{\text{immmax}}$  として次式になる。

$$C_{\text{NH}_4\text{-N}} = C_{\text{org-N}_0} \{1 - \exp(-k_{\min} t)\} + C_{\text{imm}_{\max}} \{1 - \exp(-k_{\text{imm}} t)\} + C_{\text{NH}_4\text{-N}_0} \quad \text{式 2.3.6}$$

上式は、有機化された  $\text{NH}_4\text{-N}$  は  $C_{\text{org-N}}$  とは別のプールに入る。すなわち、 $C_{\text{org-N}}$  は増加せず、 $k_{\min}$  によってのみ減少量が決定されることに注意されたい。

上式において、 $k_{\min} \ll k_{\text{imm}}$  のときの概念図を次に示す。

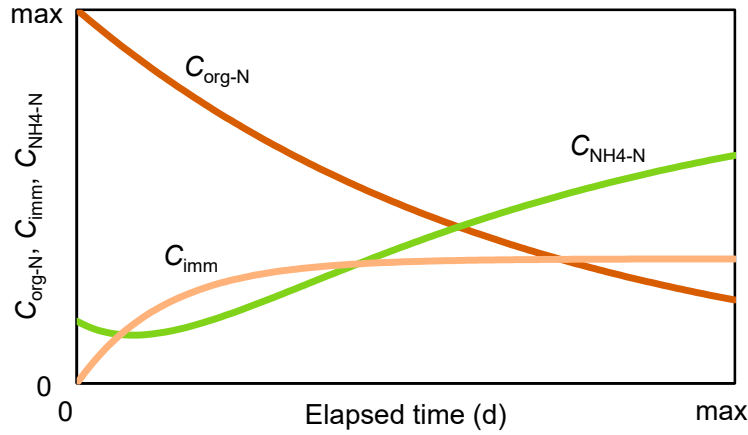


図 2.3.3 有機化・無機化平行モデルの概念図

### 2-3-2 一次分解反応式

本研究では、無機化は単純型モデル、硝化と脱窒は一次分解反応式で表せられるとした。以下にそれぞれの反応式を示す。

$$\text{無機化} \quad \frac{d}{dt} C_{\text{NH}_4\text{-N}} = k_{\min} C_{\text{org-N}} \quad \text{式 2.3.7}$$

$$\text{硝化} \quad \frac{d}{dt} C_{\text{NO}_3\text{-N}} = k_{\text{nit}} C_{\text{NH}_4\text{-N}} \quad \text{式 2.3.8}$$

$$\text{脱窒} \quad \frac{d}{dt} C_{\text{N}_2} = k_{\text{den}} C_{\text{NO}_3\text{-N}} \quad \text{式 2.3.9}$$

ここで、 $k_{\text{nit}}$ ,  $k_{\text{den}}$  [1/d] はそれぞれ硝化速度定数と脱窒速度定数、 $C_{\text{NO}_3\text{-N}}$ ,  $C_{\text{N}_2}$  はそれぞれ  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{N}_2$  である。 $k_{\text{nit}}$  は、 $C_{\text{NH}_4\text{-N}}$  の溶存態、吸着態に関わらず同じ値とした。上式を連鎖し、 $C_{\text{org-N}}$ ,  $C_{\text{NH}_4\text{-N}}$ ,  $C_{\text{NO}_3\text{-N}}$ ,  $C_{\text{N}_2}$  について求めると、次式のような連鎖反応式になる。

$$\frac{d}{dt}C_{\text{org-N}} = -k_{\text{min}}C_{\text{org-N}} \quad \text{式 2.3.10}$$

$$\frac{d}{dt}C_{\text{NH}_4\text{-N}} = k_{\text{min}}C_{\text{org-N}} - k_{\text{nit}}C_{\text{NH}_4\text{-N}} \quad \text{式 2.3.11}$$

$$\frac{d}{dt}C_{\text{NO}_3\text{-N}} = k_{\text{nit}}C_{\text{NH}_4\text{-N}} - k_{\text{den}}C_{\text{NO}_3\text{-N}} \quad \text{式 2.3.12}$$

$$\frac{d}{dt}C_{\text{N}_2} = k_{\text{den}}C_{\text{NO}_3\text{-N}} \quad \text{式 2.3.13}$$

上式において、 $k_{\text{min}} > k_{\text{nit}} > k_{\text{den}}$  のときの概念図を次に示す。

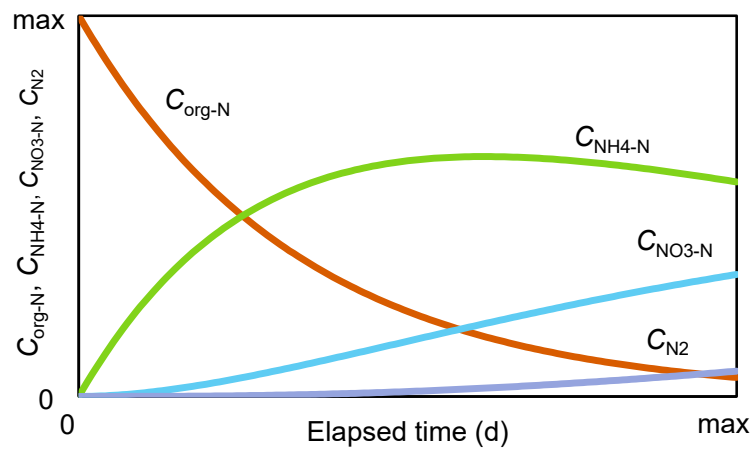


図 2.3.4 連鎖反応式の概念図

### 2-3-3 無機化の温度・水分依存性

ここでは、無機化の温度・水分依存性を表す式や、研究例を示す。

#### 〈温度依存性〉

無機化の温度依存性を表す式として、 $Q_{10}$  値、Arrhenius の式、有機質資材窒素無機化モデル、永源（2022）のモデルがある。順に説明する。

$Q_{10}$  値は、温度を  $10^\circ\text{C}$  上昇させると反応速度が 2-3 倍になるのを、速度の比  $Q_{10}$  として表す方法である（金野, 1979）。古賀ら（2023）は、投入した有機肥料の無機化速度定数  $k_{\text{min}} [\text{d}]$  に次式を乗じることで、温度依存性を表した。

$$f(T) = Q_{10}^{\frac{T-30}{10}} \quad \text{式 2.3.14}$$

ここで、 $T[^\circ\text{C}]$ は温度、 $Q_{10}[-]$ はパラメータである。多種多様の有機物を投入し、全有機物共通の値の平均値として  $Q_{10} = 1.47$  を得た。式 2.3.14 に代入した結果を図 2.3.5 に示す。

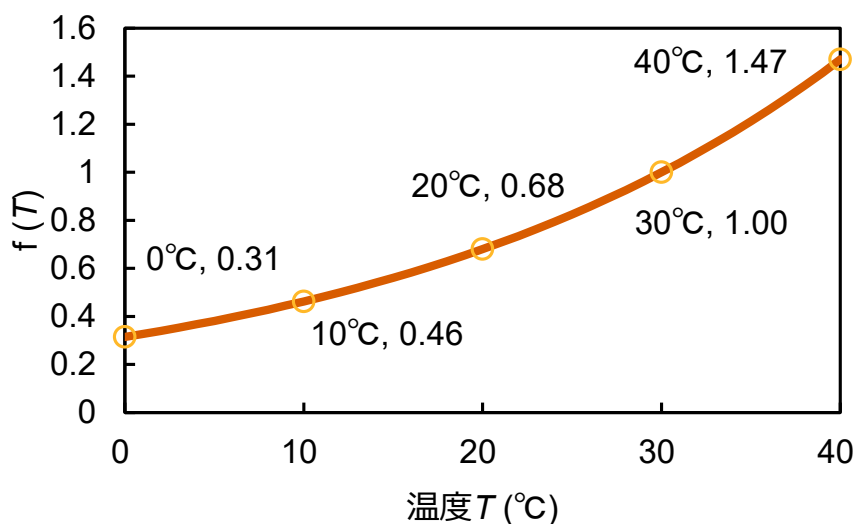


図 2.3.5  $Q_{10}$  値

図のように  $Q_{10}$  値は、式 2.3.14 の場合  $30^\circ\text{C}$  で  $f(T) = 1$  となり、温度が  $10^\circ\text{C}$  変化すると  $Q_{10}$  倍  $f(T)$  が変化する。

Arrhenius の式は、無機化速度定数  $k_{\min}$  [d] と温度  $T$  [K] との関係性を次式で表す (杉原ら, 1986)。

$$k_{\min} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad \text{式 2.3.15}$$

ここで、 $A$  [d] は定数、 $E_a$  [J/mol] は見かけの活性化エネルギー、 $R$  [8.31 J/(K·mol)] は気体定数である。 $T_1$  のとき  $k_{\min 1}$ 、 $T_2$  のとき  $k_{\min 2}$  として上式に代入すると、次式が導ける。

$$\frac{k_{\min 2}}{k_{\min 1}} = \frac{A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_2}\right)}{A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_1}\right)} \quad \text{式 2.3.16}$$

上式を  $k_{\min 2}$  について解くと、次式になる。

$$k_{\min 2} = k_{\min 1} \exp\left(\frac{E_a}{R} \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1}\right) \quad \text{式 2.3.17}$$

上式から、 $E_a$  を求めるためには、2 点の温度  $T_1, T_2$  における  $k_{\min 1}, k_{\min 2}$  が分かれば求めることが出来る。また、上式を用いた窒素量予測の検討も多く行われている（今野ら, 1996；進藤ら, 2002；末吉ら, 2004；石橋ら, 2014；大橋ら, 2017）。しかし、これらは室内実験を基に得た値であり、圃場で検証されていても作物の収量や品質を化成肥料施肥区と比較したのみである。すなわち、土中の有機肥料の経時変化無機化量について検証された例は少ない。

有機質資材窒素無機化モデルは、酸性デターエージェント可溶有機態窒素（ADSON）含量を用いて、施用した有機肥料の無機化を表したモデルである（式 2.3.18）（古賀ら, 2023）。ADSON は、AD 溶液（界面活性剤を含む硫酸用液）に溶解する有機態窒素成分であり（古賀ら, 2019）、土壌中での有機肥料分解によって生成する無機態窒素量と高い正の相関を有することが報告されている（小柳ら, 2016；小柳, 2017）

$$N_{\min} = \frac{ADSON^2}{a_1 + ADSON^2} N_{in} \{1 - \exp(-k_{\min} \cdot f(T) \cdot f(\theta) \cdot t)\} \quad \text{式 2.3.18}$$

ここで、 $N_{\min}$ ,  $N_{in}$  [g-N/m<sup>2</sup>] は投入した有機肥料の無機化量と投入量、 $a_1$  [-] はパラメータ、 $ADSON$  [mg-N/g<sub>dry</sub>] は有機肥料の ADSON 含有量、 $f(\theta)$  [-] は  $k_{\min}$  の水分依存性を表す係数、 $t$  [d] は経過日数である。上式の特徴として、 $k_{\min}$  の温度依存性だけでなく水分依存性を表しており、 $N_{in}$  を Michaelis-Menten 式を応用した多項式で表している。この多項式は 1-3 次式の範囲で検討し、2 次式が最も適切であると古賀らは報告している。

望月ら（2023）は上式を用いて、畑条件における有機肥料の経時変化無機化量を測定値と比較した。上式は、施肥初期に予測値の過小評価、3 月試験の 12 週目（7 月）に予測値の過大評価があり、過大評価は窒素溶脱、すなわち脱窒や下方浸透等を考慮することでより正確に予測できるとしている。

永源（2022）は、米ぬかを肥料として施用した水田土中の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  を測定した。無機態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  の和）の無機化量を式 2.3.7 で表し、温度と  $k_{\min}$  の関係が指数関数で増加していることから、次式で表せるとした（以下、永源モデル）。

$$k_{\min} = A \exp(BT) \quad \text{式 2.3.19}$$

ここで、 $A$  [1/d]は温度  $0^\circ\text{C}$ のときの  $k_{\min}$ 、 $B$  [ $1/^\circ\text{C}$ ]は定数、 $T$  [ $^\circ\text{C}$ ]は温度である。上式の特徴として、式 2.3.17 の温度の項がより単純化されている。永源は、 $A = 0.0001$  [1/d]と仮定して上式を用い、湛水、非湛水時の温度と米ぬかの  $k_{\min}$  の関係を求めた。結果を次式に示す。

$$\text{湛水} \quad k_{\min} = 0.0001 \exp(0.215T) \quad \text{式 2.3.20}$$

$$\text{非湛水} \quad k_{\min} = 0.0001 \exp(0.263T) \quad \text{式 2.3.21}$$

Arrhenius の式 2.3.17 を、上式に近似した。0-20  $^\circ\text{C}$ で近似した結果を図 2.3.6-a に、10-30  $^\circ\text{C}$ で近似した結果を図 2.3.6-b に示す。0-20  $^\circ\text{C}$ で近似すると、湛水、非湛水時の  $E_a$  は 142542, 174510 [J/mol]になった。10-30  $^\circ\text{C}$ で近似すると、湛水、非湛水時の  $E_a$  は 147325, 180396 [J/mol]になった。

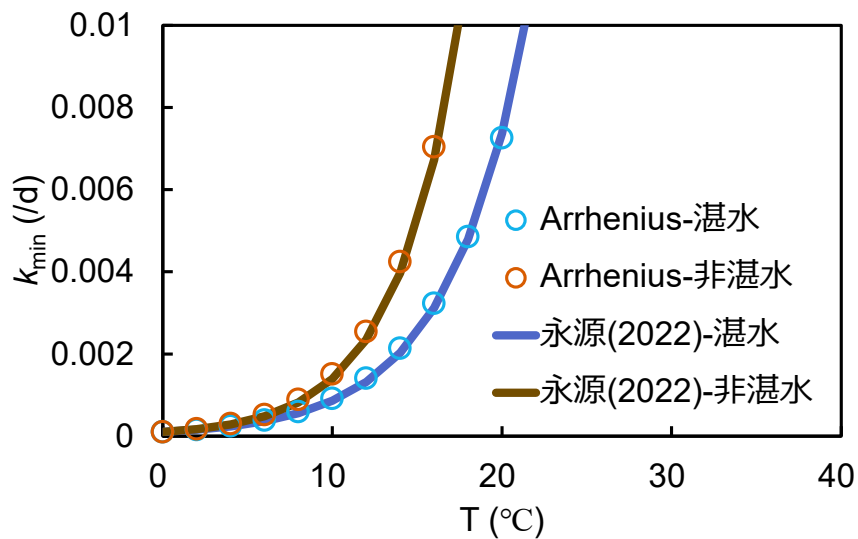


図 2.3.6-a 式 2.3.17 を 0-20  $^\circ\text{C}$ の範囲で近似した結果



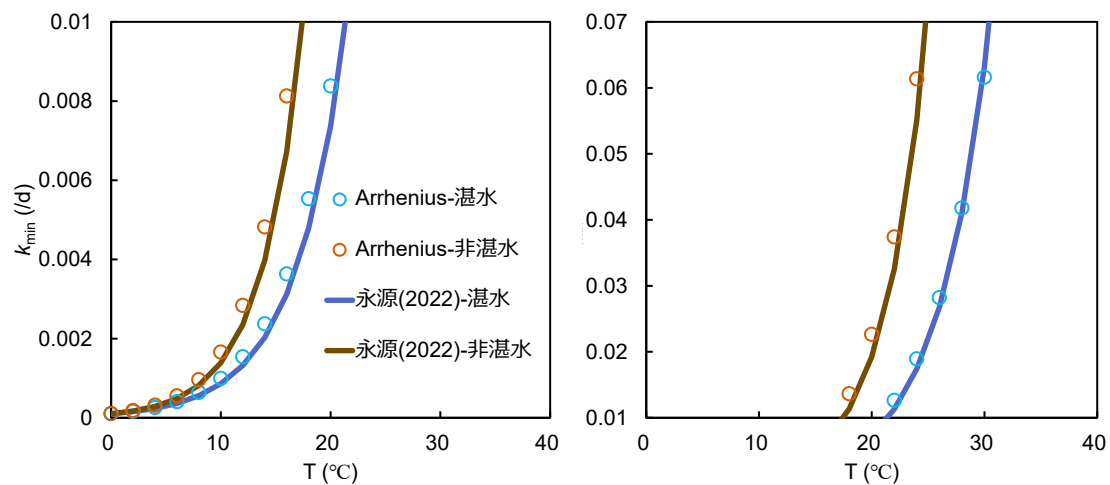


図 2.3.6-b 式 2.3.17 を 10-30 °C の範囲で近似した結果

図より、ある程度の温度領域において、永源モデル式 2.3.19 は Arrhenius の式 2.3.17 と一致することがわかる。

本研究では、非湛水時の地温は約 10-20 °C、湛水時の地温は約 15-30 °C だったこと、永源 (2022) と比較することから、永源モデル式 2.3.19 を用いて  $k_{\min}$  の温度依存性を表す。ただし、上記のように Arrhenius の式 2.3.17 と一致するか随時確認する必要がある。

### 〈水分依存性〉

無機化の水分依存性を表す式として、Century モデル (Sierra et al., 2015), Johnsson モデル (1987) がある。

古賀ら (2023) は、 $k_{\min}$  [d] に次式の Century モデルを乗じることで、水分依存性を表した。

$$f(\theta) = \frac{1}{1 + b \exp(-8.5\theta)} \quad \text{式 2.3.22}$$

ここで、 $b$  [-] はパラメータである。上式を図 2.3.7 に示す。

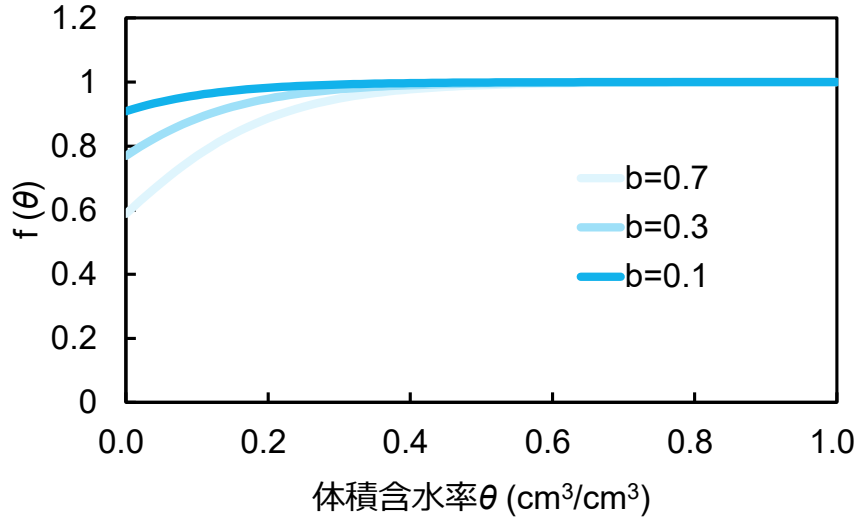


図 2.3.7 Century モデル

図のように、 $\theta$ が大きくなるほど $f(\theta)$ は1に近づき、曲線的に増加するのが特徴である。また、 $b$ の値が大きいほど、 $\theta$ が小さいときの $f(\theta)$ は小さくなる。

Johnsson (1987) は、土中水分依存補正関数  $e_m [-]$  を  $k_{\min}$  に乗じることで与えた。 $e_m$  は、土中の体積含水率  $\theta [\text{cm}^3/\text{cm}^3]$  を 4 つの閾値 ( $\theta_{\text{wilt}} \leq \theta_{\text{low}} \leq \theta_{\text{high}} \leq \theta_s$ ) で区分し、パラメータ  $e_s$  ( $\theta = \theta_s$  の  $e_m$ ) を用いて次式で定義する。また、概念図を図 2.3.8 に示す。

$$e_m = \begin{cases} 0 & (\theta \leq \theta_{\text{wilt}}) \\ \frac{\theta - \theta_{\text{wilt}}}{\theta_{\text{low}} - \theta_{\text{wilt}}} & (\theta_{\text{wilt}} \leq \theta \leq \theta_{\text{low}}) \\ 1 & (\theta_{\text{low}} \leq \theta \leq \theta_{\text{high}}) \\ e_s + (1 - e_s) \left( \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_{\text{high}}} \right) & (\theta_{\text{high}} \leq \theta \leq \theta_s) \end{cases} \quad \text{式 2.3.23}$$

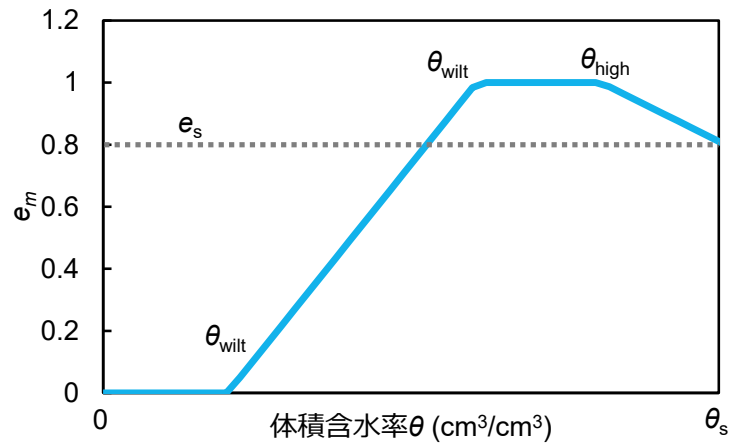


図 2.3.8 Johnsson モデル

図のように、 $\theta$ を増減させると  $e_m$ は直線的に増減し、 $\theta > \theta_{\text{high}}$ の場合、 $e_m$ は1より減少するのが特徴である。

木村（2017）、岡田（2021）は、黒ボク土のパッチ試験を行い（25℃）、水分量を変えたときの  $\text{NH}_4\text{-N}$  の経時変化を、一次分解反応式（式 2.3.7）を用いて表した。結果を図 2.3.9 に示す

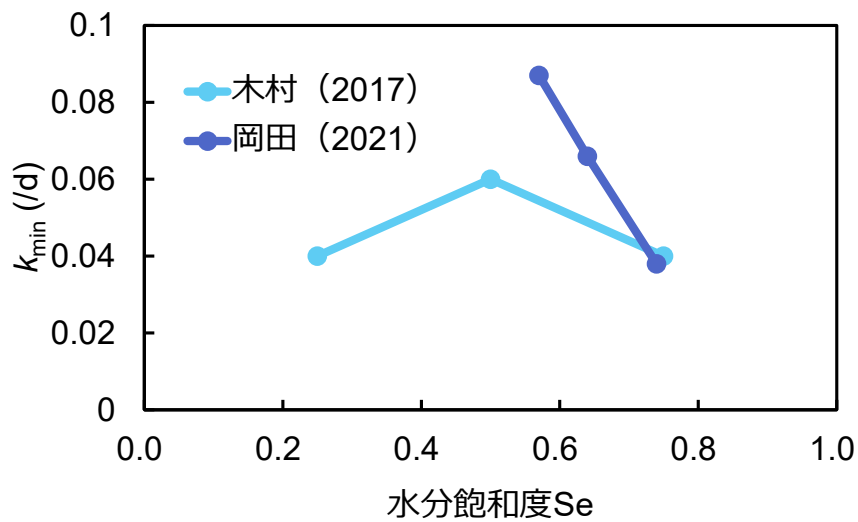


図 2.3.9 無機化の水分依存性（木村, 2017；岡田, 2021）

図のように水分飽和度  $\text{Se}$  がある値より大きいと、 $k_{\text{min}}$ は低下する。このような水分依存性は、Johnsson モデルで表すことが出来る。そのため、本研究では Johnsson モデルを使用する。

## 2-3-4 硝化の温度・水分依存性

### 〈温度依存性〉

渡辺ら（2019）は、岩手大黒ボク土のパッチ試験を行い（水分飽和度 75 %）、温度（22, 24, 26 °C）を変えたときの  $\text{NO}_3\text{-N}$  の経時変化を、一次分解反応式（式 2.3.8）を用いて表した。中村ら（2007）も同様に、鳥取黒ボク土（水分飽和度 60 %）で温度（5, 15, 25, 35 °C）を変えパッチ試験を行った。結果を図 2.3.10 に示す。

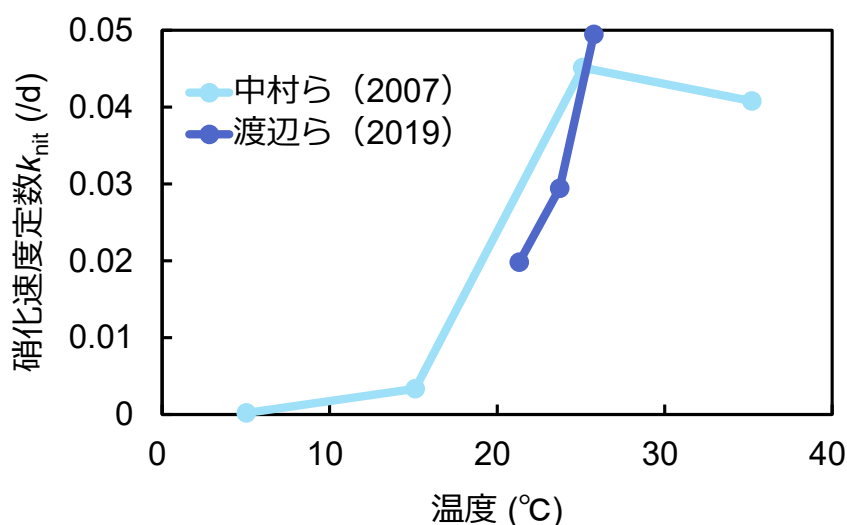


図 2.3.10 硝化の温度依存性（渡辺ら, 2019；中村ら, 2007）

図より硝化速度定数  $k_{\text{nit}}$  [1/d]は、15 °Cより低いと極端に小さく、22 °Cより高いと極端に大きくなる。また、35 °Cでは 25 °Cより低下することが分かる。

渡辺ら（2019）は、パッチ試験で全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  の硝化速度定数  $k_{\text{nit}}$  だけでなく、溶存態  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、吸着態  $\text{NH}_4\text{-N}$  の硝化速度定数  $\mu_l$ ,  $\mu_a$  [1/d]も求めた。パッチ試験では  $k_{\text{nit}}$  同様、 $\mu_l$ ,  $\mu_a$  と溶存態、吸着態を分けた場合でも一次分解で表せたとしている。しかし、土中水流れを伴うカラム浸透実験においてパッチ試験で求めた  $k_{\text{nit}}$ ,  $\mu_l$ ,  $\mu_a$  の値を使用した結果、9 日後の上層の  $\text{NO}_3\text{-N}$  は計算値が測定値を過大評価し、29 日後の  $\text{NH}_4\text{-N}$  は計算値が測定値を過大評価した。また、計算値の  $\text{NO}_3\text{-N}$  の過大評価、 $\text{NH}_4\text{-N}$  過小評価と  $\mu_l$ ,  $\mu_a$  の大小関係は、 $\mu_l < \mu_a$  ほど  $\text{NO}_3\text{-N}$  の過大評価、 $\text{NH}_4\text{-N}$  過小評価の傾向が強まるとしている。そして、浸透過程にある土中では吸着態  $\text{NH}_4\text{-N}$  より溶存態  $\text{NH}_4\text{-N}$  の方が硝化しやすく、先に溶存態を硝化してから吸着態を硝化する可能性、溶存態より遅れて吸着態を硝化する可能性、吸着態の硝化速度は周囲の溶存陽イオン濃度に依存する可能性、と 3 つの可能性があると結論付けている。本研究では  $\mu_l$ ,  $\mu_a$  の比が明確ではないため、溶存態  $\text{NH}_4\text{-N}$  と吸着態  $\text{NH}_4\text{-N}$  の硝化速度は同じ、すなわち  $\mu_l = \mu_a$  とした。

### 〈水分依存性〉

武藤ら (2019) は、渡辺ら (2019) と同じ試料でパッチ試験を行い (25 °C)、水分飽和度 (0.33, 0.50, 0.66, 0.83) を変えたときの  $\text{NO}_3\text{-N}$  の経時変化を一次分解反応式 (式 2.3.8) を用いて表した。中村ら (2007) も同様に、鳥取黒ボク土 (25 °C) で水分飽和度 (0.25, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00) を変えパッチ試験を行った。結果を図 2.3.11 に示す。

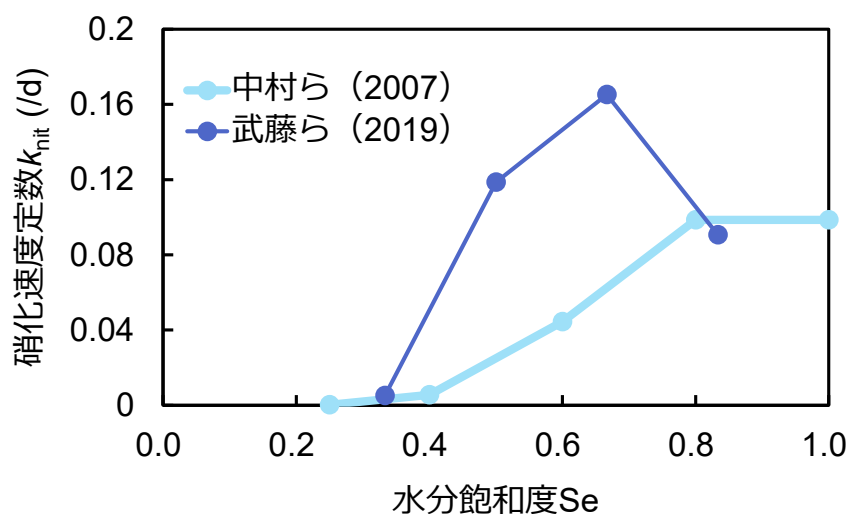


図 2.3.11 硝化の水分依存性 (武藤ら, 2019 ; 中村ら, 2007)

図より  $k_{nit}$  は、水分飽和度が 0.4 より小さいと極端に小さく、水分飽和度 0.66-0.80 で最大になることが分かる。また、中村らのデータは水分飽和度 0.80-1.00 で最大を示しているが、水分飽和度 1.00 のときは湛水状態ではないため十分な還元状態に達しなかったことが原因だと中村らは考察している。

## 2-4 イネ

イネは窒素を養分として土中水と共に吸収し、窒素吸収量はイネの生育段階ごとに変化する。本節では、イネの各生育段階の概要、およびイネの窒素、土中水吸収について述べる。

### 2-4-1 栄養源

作物には、その元素がなければ作物の生育ができない必須元素がある。このうち、多量に必要な元素を多量必須元素と呼び、9種類存在する。各種類の内訳、および植物体内での働きを表 2.4.1 に示す（松中, 2018）。

表 2.4.1 必須元素と作物体内での働き（出典: 松中（2018）, p132, 表 12-1）

元素	吸収形態	植物体内での働き
窒素 N	$\text{NH}_4^+$ $\text{NO}_3^-$	タンパク質を構成するアミノ酸、葉緑素、各種補酵素、核酸（DNA、RNA）など植物体の生命にかかわる成分の構成要素。光合成にも強く関与し、作物の生育、収量、品質に大きな影響を与える。
リン P	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ $\text{HPO}_2^-$	生物としての遺伝情報を伝達する核酸（DNA、RNA）のほか、リン脂質の重要な構成成分。アデノシン三リン酸（ATP）として体内のエネルギー移動に関与。多くのタンパク質、補酵素、植物体内での科学的な反応のもとになる物質の構成成分。
カリウム K	$\text{K}^+$	植物体では、カリウムを構成成分とする生理的に重要な有機化合物は認められていない。細胞内の浸透圧や pH の調節、多くの酵素の活性化に関わる。気孔の開閉にも関わり光合成にも影響する。
カルシウム Ca	$\text{Ca}^{2+}$	細胞壁や細胞膜などの構造の維持や膜の透過性に関与。細胞内での刺激などの様々な情報を伝達する物質としての働きを持つ。
マグネシウム Mg	$\text{Mg}^{2+}$	葉緑素の構成成分として重要。光合成の仮定で生じる中間産物とリンの結合に関わる酵素の働きを助けることで、間接的に植物体内のリンの移動にも関与している。
硫黄 S	$\text{SO}_4^{2-}$	硫黄を含むアミノ酸（メチオニン、システイン、シスチンなど）としてタンパク質を構成する。光合成などの生体内反応や代謝調節に重要な役割。ビタミンや補酵素の構成成分でもある。

このように、作物にとって窒素は作物の生育、収量、品質に大きな影響を与える。そして、窒素の吸収形態として  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  が利用される。

作物の生育反応には  $\text{NH}_4\text{-N}$  の方が良く生育するものと、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の方が良く生育するものがある。それぞれ好アンモニア性作物、好硝酸性作物と呼び、イネ、ブルーベリーなどは好アンモニア性作物、トマト、インゲン、キャベツ、ハウレンソウ、タマネギなどは好硝酸性作物と考えられている（但野ら, 1976）。このようにイネは好アンモニア性作物であり、その生育には  $\text{NH}_4\text{-N}$  が不可欠である。

## 2-4-2 生育段階

### 〈分げつ始期〉

イネを移植し活着期間を過ぎると、根が土中から窒素を吸い始めるようになる。するとイネは茎から枝分かれする。この枝分かれが分げつであり、分げつが始まる時期を分げつ始期という。

### 〈分げつ活性期〉

分げつ始期を過ぎると、分げつ数が増えていく。このとき、分げつ数が最も多くなる時期を分げつ活性期、もしくは最高分げつ期という。分げつのうち、穂をつけて実るものを有効分げつ、穂をつけない、もしくは穂をつけても実らないものを無効分げつという。

### 〈幼穂形成期〉

分げつ活性期の後、分げつを止め、茎の中で穂の元になる幼穂をつくり始める。これを幼穂形成期もしくは幼穂原基始期という。分げつ始期から幼穂原基始期までの期間は栄養素を活発に吸収する。分げつ増加や葉の伸長にはタンパク質合成が欠かせないため、この期間の窒素の吸収量がイネの生長に影響する。また、収量構成要素の穂数は、この期間に決定される最大分げつ数に影響されるため、分げつ数の増加に関わる窒素の吸収量が、最終的な収量の増加に影響する。（Fageria, 2007）

### 〈出穂期〉

茎の中で成長した幼穂が茎から出てくることを出穂という。一つの株の 40-50 % の幼穂が出てきたときをその株の出穂といい、40-50 % の株が出穂したときを出穂期という。幼穂形成期から出穂期までの期間は、主に穂のサイズ、穂に実る小穂の数が決定される。穂の大きさは、穂長さと一穂粒数によって決まり、遺伝要因や窒素施肥量の影響を受けると言われている（Fageria, 2007）。

### 〈登熟期〉

穂が出そろってから収穫までの期間を登熟期という。この期間では、穂の色が変化する様子から乳白熟，黄熟，完熟と分けられる事もある。登熟期では小穂の充填率が決定される。出穂期以降はイネの葉・茎・根の栄養が小穂の充填へ利用される「再転流」が生じる。このため、各部位の機能が弱まっていく。しかし、小穂の充填には光合成による炭水化物生成も必要であり、イネの葉の老化防止が必要となる。実際に、穂肥（出穂前に与える追肥）によって収量が 10 %程度増加すると言われている。（Fageria, 2007）

### 〈成熟期〉

地域や品種によっても異なるが、出穂してから約 45 日，積算温度約 1000 °Cになると、もみが黄金色になる。この時期は成熟期とよび、収穫ができる時期である。

## 2-4-3 水吸収

植物根による吸水を考慮した土中水分移動は、一次元のリチャーズ式（式 2.1.2）の吸い込み項  $S$  に植物根による実吸水速度  $S_a$  を与えることで予測することができる。Feddes ら（1978）は、気象条件や植物の生育段階によって決まる植物の可能蒸散速度  $T_p$  [cm/d]を、吸水強度分布  $\beta(z)$ で各深さに分配することで可能吸水速度  $S_p(z,t)$ を求めた（式 2.4.1）。

$$S_p(z,t) = \beta(z)T_p(t) \quad \text{式 2.4.1}$$

ここで、 $\beta(z)$  [/cm]は深さ方向に積分すると 1 となる関数である。 $\beta(z)$ には、根群域で均一な分布や実際の根密度分布などが用いられる。さらに、各深さの土中水分状態に応じた水ストレス応答関数  $\alpha(h)$ を用いることで、実吸水速度  $S_a(z)$ を次式のように定義している。

$$S_a(z,t) = \alpha(h)S_p(z,t) = \alpha(h)\beta(z)T_p(t) \quad \text{式 2.4.2}$$

ここで、 $S_a(z,t)$  [/d]は単位時間，単位体積あたりの植物根による実吸水速度， $S_p(z,t)$  [/d]は単位時間，単位体積あたりの可能吸水速度， $\alpha(h)$  [-]は土中水圧力  $h$  [cm]に依存する水ストレス応答関数， $z$  [cm]は上向き正の位置座標である。 $\alpha(h)$ については後述する。

ここで、実蒸発速度  $T_a(t)$ に対して作物体内における水の貯留量増加は無視できると仮定すれば、式 2.4.1, 2.4.2 より、各深さの吸水速度  $S_a$ を根群域の深さ  $L$  [cm]に対して積分することで、 $T_a$ を表すことができる（式 2.4.3）。

$$T_a(t) = \int_{-L}^0 S_a(z,t)dz = T_p(t) \int_{-L}^0 \alpha(h(z))\beta(z)dz \quad \text{式 2.4.3}$$



### 2-4-3-1 水ストレス応答関数 $\alpha(h)$

蒸発や蒸散（根の吸水）によって土が乾燥すると、各深さの植物根の吸水は水ストレスによって制限される。水ストレス応答関数  $\alpha(h)$  [-] は土中水圧力  $h$  によって変化する無次元関数であり、適度な土中水分状態で十分な吸水が可能な場合  $\alpha(h) = 1$ 、乾燥等で吸水が低下する場合  $0 \leq \alpha(h) < 1$  となる。 $\alpha(h)$  を表す様々なモデルとして、Feddes ら（1978）と van Genuchten（1987）がある。本研究では Feddes らのモデルを用いたが（以下、Feddes モデル）、ここではそれぞれについて説明する。

#### 〈Feddes モデル〉

Feddes ら（1978）は、水ストレス  $\alpha(h)$  を 4 つの土中水圧力（ $h_4 \leq h_3 \leq h_2 \leq h_1$  [cm]）の閾値で区分される線形の関数として次のように定義した。また、式 2.4.4 を図 2.4.1 に示す。

$$\alpha(h) = \begin{cases} 0 & (h \leq h_4, h_1 \leq h) \\ \frac{h-h_1}{h_2-h_1} & (h_2 \leq h \leq h_1) \\ 1 & (h_3 \leq h \leq h_2) \\ \frac{h-h_4}{h_3-h_4} & (h_4 \leq h \leq h_3) \end{cases} \quad \text{式 2.4.4}$$

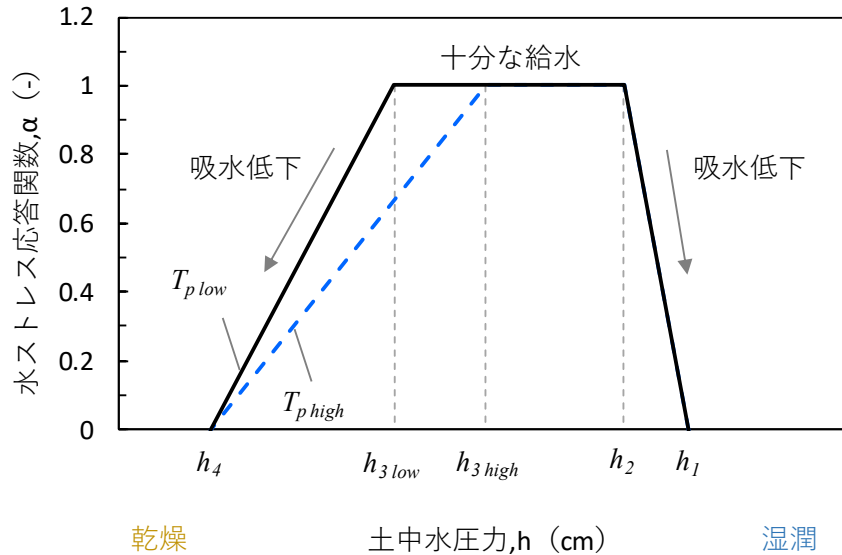


図 2.4.1 Feddes モデルにおける水ストレス応答関数

Feddes モデルでは、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$  からなる 3 つの領域において、水ストレスが線形で表せるとした。 $h_1$  は嫌気点に対応する。これよりも土が濡れているとき（ $h > h_1$ ）、植物根は酸素が欠乏した状態となり、吸水不能となる（ $\alpha(h) = 0$ ）。また、 $h_4$  は永久萎れ点に対応し、土が

乾燥して  $h < h_4$  となると、同様に根の吸水が 0 となる。なお、モデルの上では  $h < h_4$  となっても、その後  $h$  が湿潤な状態となれば吸水が再開されるため、厳密には永久萎れ点とは異なることに注意する必要がある。 $h$  が  $h_2$  と  $h_3$ （初期萎凋点に対応）の間の範囲にあるとき、可能吸水が起こり吸水量は最大となる ( $\alpha(h)=1$ )。一方、 $h$  が  $h_1$  と  $h_2$  の間の範囲にあるとき、 $\alpha(h)$  は  $h$  とともに線形で増加し、 $h_3$  と  $h_4$  の間の範囲にあるときは線形で減少する。さらに、 $h_3$  の値は  $T_p$  の大きさによって異なり、 $T_p$  が小さい程  $h_3$  が小さく、逆に  $T_p$  が大きい程  $h_3$  が大きくなることが知られている。HYDRUS では  $h_3$  を次式のように定義している。

$$h_3 = \begin{cases} h_{3\text{high}} + \frac{h_{3\text{low}} - h_{3\text{high}}}{T_{p\text{high}} - T_{p\text{low}}} (T_{ph} - T_p) & (T_{p\text{low}} \leq T_p \leq T_{p\text{high}}) \\ h_{3\text{low}} & (T_p \leq T_{p\text{low}}) \\ h_{3\text{high}} & (T_p \geq T_{p\text{high}}) \end{cases} \quad \text{式 2.4.5}$$

ここで、 $h_{3\text{high}}$  [cm] は  $h_3$  の最大値、 $h_{3\text{low}}$  [cm] は  $h_3$  の最小値、 $T_{p\text{high}}$  [cm/d] は最大可能蒸散速度、 $T_{p\text{low}}$  [cm/d] は最小可能蒸散速度である。これらのパラメータにより、 $h_3$  を  $T_p$  に応じて変化する量として与えることが可能となる。

### 〈S-shape モデル〉

van Genuchten (1987) は、次のような滑らかな S 型の水ストレス応答関数を定義した（以下、S-shape モデル）。

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{P50}\right)^{P3}} \quad \text{式 2.4.6}$$

式中の  $P3$  は経験定数、 $P50$  [cm] は実吸水速度が可能蒸散速度の半分になるときの土中水圧力である。S-shape モデルは Feddes モデルと異なり、与えるパラメータが少ない。さらに、飽和近傍において根の吸水が制限されることを無視しているが、これは飽和または飽和近傍となる条件が非常に短期間にしか起こらないという点を考慮して簡素化されたものであり、van Genuchten (1987) は指摘している。

### 2-4-3-2 補填吸水モデル

補填吸水モデルとは、土の乾燥によって各深さの吸水速度が低下したとき、根圏全体の吸水速度を保つために補填的に吸水を行うモデルである。まず、補填吸水が起こらないときの実蒸散速度  $T_a$  と可能蒸散速度  $T_p$  の比  $T_a/T_p$  を  $\omega$  として、次式に示す。

$$\frac{T_a(t)}{T_p(t)} = \int_L \alpha(h)\beta(z)dz = \omega \quad \text{式 2.4.7}$$

可能蒸散が起きている場合は実蒸散速度と可能蒸散速度が一致する ( $T_a = T_p$ ) ため  $\omega = 1$  であるが、可能蒸散が制限され実蒸散速度が可能蒸散速度を下回る ( $T_a < T_p$ ) と  $\omega < 1$  となる。ここで、実蒸散速度を可能蒸散速度と等しくするような補填吸水（完全な補填吸水）が起こる  $\omega$  の閾値（Root adaptability factor）を  $\omega_c$  と定義し、 $\omega \geq \omega_c$  となるときは  $\omega = 1$  を満たす完全な補填吸水が生じるとする。一方、 $\omega < \omega_c$  のときも補填吸水が起こるが、根圏全体の吸水速度（蒸散速度）は可能蒸散速度よりも小さい。そのため、 $\omega_c$  が小さいほど補填吸水の効果を高めて、 $T_a$  を強制的に増加させる（図 2.4.2）。

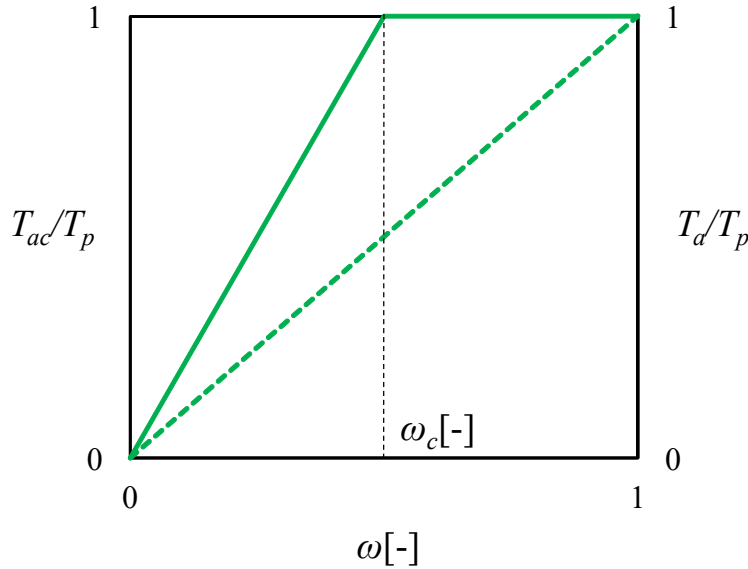


図 2.4.2 補填実蒸発散速度・可能蒸発散速度の比と無次元ストレス関数との関係

ここで、実蒸散速度  $T_a$  に  $\omega$  の逆数をかけることで、補填後の実蒸散速度  $T_{ac}$  を定義する。完全な補填吸水が起きたとき ( $\omega \geq \omega_c$ ) の補填後の実蒸散速度と可能蒸散速度の比，補填後の各深さの吸水速度は次式で表せる。

$$\frac{T_{ac}(t)}{T_p(t)} = \frac{T_a(t)}{T_p(t)\omega(t)} = \frac{1}{\omega(t)} \int_L \alpha(h)\beta(z)dz = \frac{\omega(t)}{\omega(t)} = 1 \quad \text{式 2.4.8}$$

$$S_c(z,t) = \alpha(h,t)\beta(z,t) \frac{T_p(t)}{\omega(t)} \quad \text{式 2.4.9}$$

$T_{ac}$  [cm/d] は補填吸水が起きたときの实蒸散速度， $S_c$  [d] は補填吸水が起きたときの各深さの

実吸水速度である。 $\omega < \omega_c$  となるとき、補填後の実蒸散速度は補填されないときの実蒸散速度に  $\omega_c$  の逆数をかけたものと定義する。補填後の実蒸散速度と可能蒸散速度の比、実吸水速度は次式となる。

$$\frac{T_{ac}(t)}{T_p(t)} = \frac{T_a(t)}{T_p(t)\omega_c} = \frac{1}{\omega_c} \int_L \alpha(h)\beta(z)dz = \frac{\omega(t)}{\omega_c} < 1 \quad \text{式 2.4.10}$$

$$S_c(z,t) = \alpha(h)\beta(z,t) \frac{T_p(t)}{\omega_c} \quad \text{式 2.4.11}$$

$\omega_c = 1$  のとき補填吸水は起こらず、 $\omega_c = 0$  のときは完全に補填される。しかし、式 2.4.8 より  $\omega_c = 0$  は定義されない。つまり、補填吸水が考慮されない根の吸水は補填吸水の閾値が  $\omega_c = 1$  となる特別な場合である。式 2.4.8-2.4.11 より、補填吸水モデルをまとめると次式で示される。

$$\frac{T_{ac}(t)}{T_p(t)} = \frac{T_a(t)}{T_p(t)\max[\omega(t), \omega_c]} = \frac{\omega(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} < 1 \quad \text{式 2.4.12}$$

$$S_c(z,t) = \alpha(h,t)\beta(z,t) \frac{T_p(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} \quad \text{式 2.4.13}$$

したがって、補填吸水モデルの実蒸散速度  $T_{ac}$  は次式で表される。

$$T_{ac}(t) = \frac{T_p(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} \int_L \alpha(h)\beta(z)dz \quad \text{式 2.4.14}$$

上式により、補填吸水を考慮した実蒸散速度は水ストレスの関数となる。したがって、根の吸水は水ストレスのない条件 ( $\alpha(h)=1$ ) においては最大となり、 $\alpha(h)=0$  のときは吸水ができなくなる。

本研究では、イネ栽培時は湛水条件であるため、栽培期間では  $T_a / T_p = \omega = 1$  であると考えられる。そのため、補填吸水は考慮しなかった。

#### 2-4-4 可能蒸発速度と可能蒸散速度

農地において、可能蒸発速度  $E_p$  と可能蒸散速度  $T_p$  を分けて測定することは難しく、気象データからペンマン式（三浦ら, 1993）を用いて求めたペンマンの可能蒸発散量から、可能蒸散速度を推定することが多い。推定式を次に示す。

$$ET_p = ET_{pen} \times K_c \quad \text{式 2.4.15}$$

ここで、 $ET_{pen}$  [cm/d]はペンマンの可能蒸発散速度、 $ET_p$  [cm/d]は可能蒸発散速度、 $K_c$  [-]は作物係数である。 $K_c$ は栽植密度等の生育条件によって変わると考えられるため、圃場毎、植物の生長に合わせて決定する必要がある。本研究では $K_c = 1$ とし、 $ET_{pen} = ET_p$ とした。

### 〈Penman 式〉

日可能蒸発散量は気象データからペンマン式を用いて計算した。

$$ET_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{S}{\ell} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad \text{式 2.4.16}$$

ここで、 $ET_{pen}$  [mm]はペンマンの可能蒸発散位、 $\Delta$  [hPa/°C]は気温  $T$  [°C]での温度飽和水蒸気圧曲線の勾配、 $S$  [MJ/m<sup>2</sup>]は純放射量、 $\gamma$  [0.66 hPa/°C]は乾湿計定数、 $\ell$  [MJ/kg]は水の蒸発潜熱、 $f(u_2)(e_{sa} - e_a)$  [mm/d]はダントン型蒸発量推定式である。

温度飽和水蒸気圧曲線の勾配 $\Delta$ と水の蒸発潜熱 $\ell$ は、気温  $T$  [°C]を用いて次式で表される。

$$\Delta = 0.4495 + 0.2721 \cdot 10^{-1} \cdot T + 0.9873 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \\ + 0.2907 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0.2538 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 \quad \text{式 2.4.17}$$

$$\ell = 2.5 - 0.0024 \times T \quad \text{式 2.4.18}$$

また、風速関数 $f(u_2)$ 、 $T$ における飽和水蒸気圧 $e_{sa}$  [hPa]、空気の水蒸気圧 $e_a$  [hPa]はそれぞれ次式で表される。

$$f(u_2) = 0.26(1 + 0.54u_2) \quad \text{式 2.4.19}$$

$$e_{sa} = 6.1078 \exp\left(\frac{17.2694T}{T + 237.3}\right) \quad \text{式 2.4.20}$$

$$e_a = e_{sa} RH / 100 \quad \text{式 2.4.21}$$

ここで、 $u_2$  [m/s]は高さ 2 m での日平均風速、 $RH$  [%]は相対湿度である。本研究では、非栽培時の非湛水・裸地、湛水・裸地期間の可能蒸発量  $E_p$ 、栽培時の湛水・被植期間の可能蒸発散量  $ET_p$  はペンマンによる可能蒸発散量  $ET_{pen}$  と同じ値であるとした。

### 〈可能蒸発散速度 $ET_p$ の分離〉

根の吸水を考慮したリチャーズ式を解くためには、可能蒸発散速度  $ET_p$  を可能蒸発速度  $E_p$  と可能蒸散速度  $T_p$  に分離して与える必要がある。本研究では、葉面積指数 (LAI) の関数

として、 $E_p$  と  $T_p$  を求めた。(Ritchie, 1972 ; Belmans et al., 1983)。

$$\begin{aligned} T_p &= ET_p \{1 - \exp(-a_i \times LAI)\} \\ E_p &= ET_p \{\exp(-a_i \times LAI)\} \end{aligned} \quad \text{式 2.4.22}$$

$a_i$  [-]は定数で、作物や栽培条件などに依存する。

## 2-4-5 溶質吸収

Šimůnek ら (2009) は、植物根による溶質吸収を、受動吸収(passive uptake)と能動吸収(active uptake)の和として与えた。

$$r_a(z, t) = p_a(z, t) + a_a(z, t) \quad \text{式 2.4.23}$$

$$R_a(t) = P_a(t) + A_a(t) \quad \text{式 2.4.24}$$

ここで、 $r_a$ ,  $p_a$ ,  $a_a$  [mol/(cm<sup>3</sup>・d)]はそれぞれ植物根による単位時間、単位体積あたりの溶質吸収速度、受動吸収速度、能動吸収速度で、 $R_a$ ,  $P_a$ ,  $A_a$  [mol/(cm<sup>2</sup>・d)]はそれぞれ植物根圏全体からの単位時間あたりの溶質吸収速度、受動吸収速度、能動吸収速度である。

### 〈受動吸収〉

受動吸収は、溶液中に溶けている栄養分が蒸散による植物根の吸水と共に吸収される。数学的には、根の吸収速度と溶液の濃度との積で表される。

$$p_a(z, t) = s^*(z, t) \min[C(z, t), C_{\max}] \quad \text{式 2.4.25}$$

ここで、 $C$  [mol/cm<sup>3</sup>]は単位時間、単位体積当たりの濃度、 $C_{\max}$  [mol/cm<sup>3</sup>]は単位時間、単位体積当たりの最大吸収濃度、 $s^*$  [d]は補填吸水モデルを考慮した単位時間、単位体積あたりの実蒸散速度である。受動吸収は  $C_{\max}$  で制限されており、溶液の濃度が  $C_{\max}$  以下であれば、受動吸収は制限されない。また、 $C_{\max} = 0$  の場合は受動吸収は生じない。

$p_a$  を植物根域で積分すると  $P_a$  が得られる。

$$\begin{aligned} P_a(t) &= \int_L s^*(z, t) \min[C(z, t), C_{\max}] dz \\ &= \frac{T_p(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} \int_L \alpha(h) \beta(z) \min[C(z, t), C_{\max}] dz \end{aligned} \quad \text{式 2.4.26}$$

ここで、 $T_p$  [cm/d]は可能蒸散速度、 $\alpha(h)$  [-]は土中水圧力  $h$  に依存する水ストレス応答関数、

$\beta(z)$  [/cm]は吸水強度分布である。

### 〈能動吸収〉

能動吸収では、植物が要求する潜在的な溶質吸収速度  $R_p$  [mol/(cm<sup>2</sup>・d)]と根圏全体の受動吸収速度  $P_a$  との差によって根圏全体の可能能動吸収速度  $A_p$  [mol/(cm<sup>2</sup>・d)]を定義する。

$$A_p(t) = \max[R_p(t) - P_a(t), 0] \quad \text{式 2.4.27}$$

上式は、水ストレスによって受動吸収が低下すると能動吸収が増加することを示す。これは、全溶質吸収 ( $R_p$ ) は水ストレスの影響を受けないと言い換えられる。植物の栄養要求量は水ストレスの増大によって低下するため、上式は現実的でない。そのため、潜在的な溶質吸収速度が、水ストレスによる実蒸散速度の減少に比例して小さくなるとして、次式へと修正された。

$$A_p(t) = \max\left[R_p(t) \frac{T_{ac}(t)}{T_p(t)} - P_a(t), 0\right] \quad \text{式 2.4.28}$$

ここで、 $T_{ac}$  [cm/d]は補填後の実蒸散速度、 $T_p$  [cm/d]は可能蒸散速度である。

単位時間、単位体積あたりの各深さの可能能動吸収速度  $a_p$  [/d]は、根圏全体の可能能動吸収速度  $A_p(t)$ を吸水強度分布  $\beta(z)$ で振り分けることで得られる。

$$a_p(z, t) = \beta(z)A_p(t) \quad \text{式 2.4.29}$$

次に、単位時間、単位体積あたりの各深さの実能動吸収速度  $a_a$  [/d]は Michaelis-Menten 式を用いて、次式で与えられる (Jungk, 1991)。

$$\begin{aligned} a_a(z, t) &= \frac{C(z, t) - C_{min}}{K_m + C(z, t) - C_{min}} a_p(z, t) \\ &= \frac{C(z, t) - C_{min}}{K_m + C(z, t) - C_{min}} b(z)A_p(t) \end{aligned} \quad \text{式 2.4.30}$$

ここで、 $K_m$  [mol/cm<sup>3</sup>]は Michaelis-Menten 定数、 $C_{min}$  [mol/cm<sup>3</sup>]は能動的に吸収するために必要な溶質の最小限の濃度である。

最後に、 $a_a$  を植物根域で積分することで植物根圏全体からの単位時間あたりの実能動吸収速度  $A_a$  が得られる。

$$A_a(t) = \int_L a_a(z, t) dz = A_p(t) \int_L \frac{C(z, t) - C_{min}}{K_m + C(z, t) - C_{min}} b(z) dz \quad \text{式 2.4.31}$$

溶質の補填的な吸収に関しては、能動吸収でのみ生じると仮定する。ここで、補填吸水モデルと同様に無次元ストレス関数を定義する。無次元栄養ストレス関数  $\pi(t)$  [-] を可能能動吸収速度  $A_p(t)$  に対する実能動吸収速度  $A_a(t)$  の比で与える。

$$\pi(t) = \frac{A_a(t)}{A_p(t)} = \int_L \frac{C(z, t) - C_{min}}{K_m + C(z, t) - C_{min}} b(z) dz \quad \text{式 2.4.32}$$

そして、実能動吸収速度を可能能動吸収速度と等しくするような補填吸収（完全な補填吸収）が起こる  $\pi(t)$  の閾値  $\pi_c$  [-] を設定し、補填吸収モデルを考慮した単位時間、単位体積あたりの実能動吸収速度  $a_{ac}(t)$  [mol/(cm<sup>2</sup>・d)] を次式で定義する（図 2.4.3）。

$$a_{ac}(t) = \frac{C(z, t) - C_{min}}{K_m + C(z, t) - C_{min}} b(z) \frac{A_p(t)}{\max[\pi(t), \pi_c]} \quad \text{式 2.4.33}$$

$a_{ac}(t)$  を植物根域で積分することで、補填吸収モデルを考慮した植物根圏全体からの単位時間あたりの実能動吸収速度  $A_{ac}(t)$  [mol/(cm<sup>2</sup>・d)] が得られる。

$$A_{ac}(t) = \int_L a_{ac}(z, t) dz = \frac{A_p(t)}{\max[\pi(t), \pi_c]} \int_L \frac{C(z, t) - C_{min}}{K_m + C(z, t) - C_{min}} b(z) dz \quad \text{式 2.4.34}$$

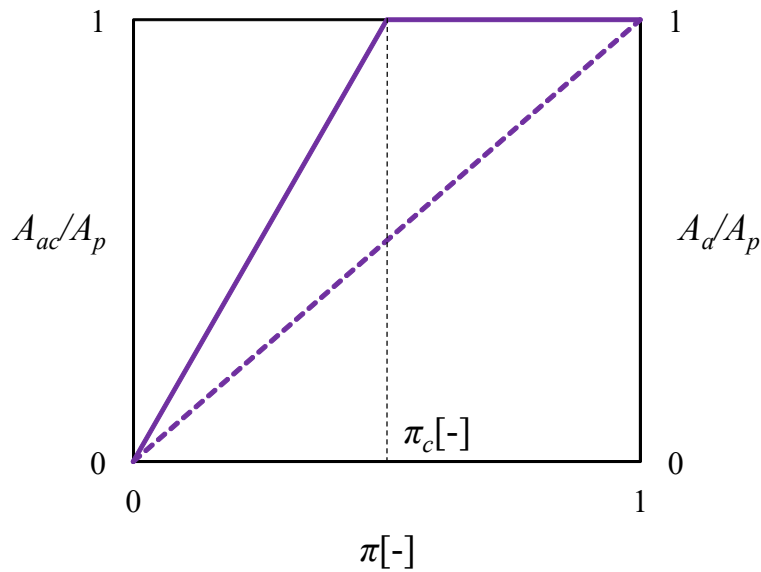


図 2.4.3 補填実能動吸収速度・可能能動吸収速度の比と無次元ストレス関数との関係



### 第3章 圃場実験による水田土中の窒素動態

水田土中の窒素動態を解明するために、異なる量の牛糞堆肥を肥料として水田に施用した。本章では、圃場実験の実験方法や測定結果を示す。

3-1 節では圃場の特徴や管理方法，3-2 節では圃場での実験方法や、採取した土・イネ試料の測定方法や換算方法，3-3 節では測定に用いたセンサー，3-4 節以降は測定結果や、土中の水分移動や窒素収支の計算結果を示す。

#### 3-1 調査地

実験は三重大学内の国際資源植物学研究室で管理する学内圃場（34°74'N、136°52'E）の内、Rice field04 で実験を行った。圃場の栽培履歴は、2016 年に荒地から水田に造成した場所、2019 年から 2021 年にかけて米ぬかを肥料としてイネを栽培した。実験期間は 2022/3/17 から 9/13 である。実際の圃場を図 3.1.1，圃場近辺の模式図を図 3.1.2 に示す。

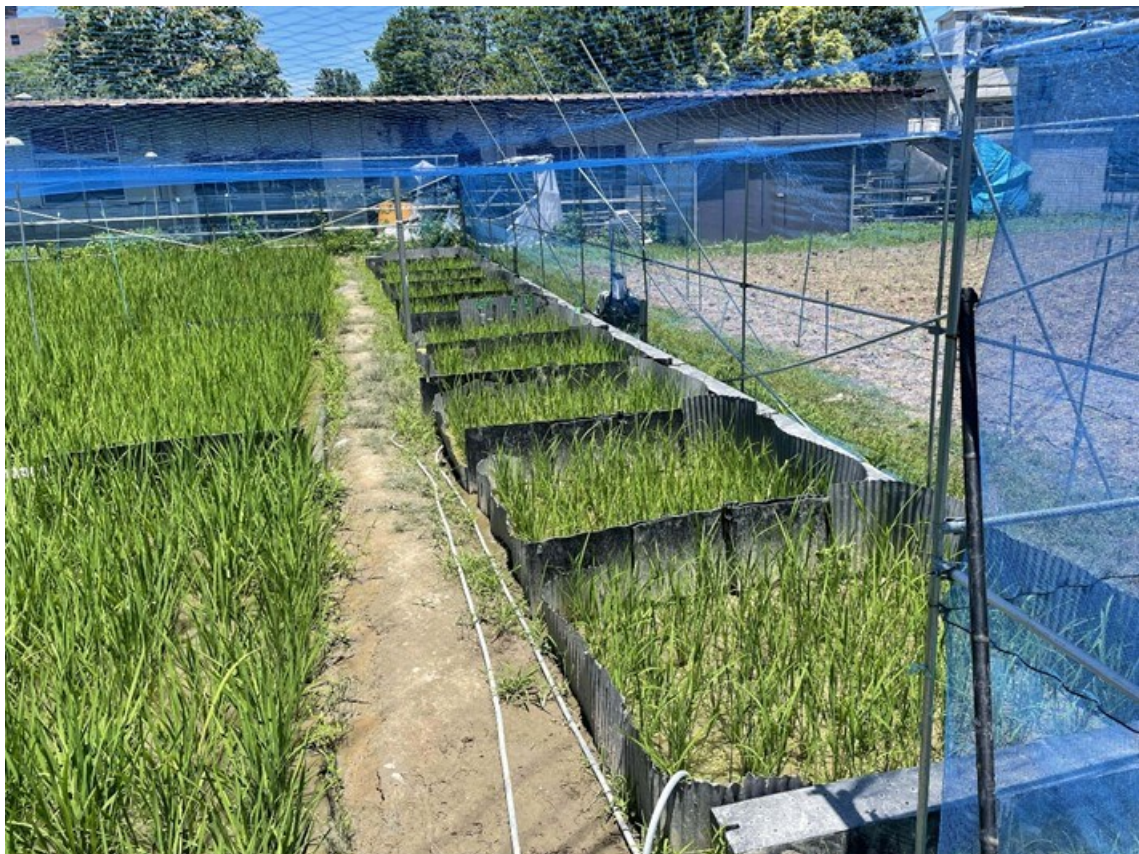


図 3.1.1 調査圃場の様子（2022/6/29 撮影）

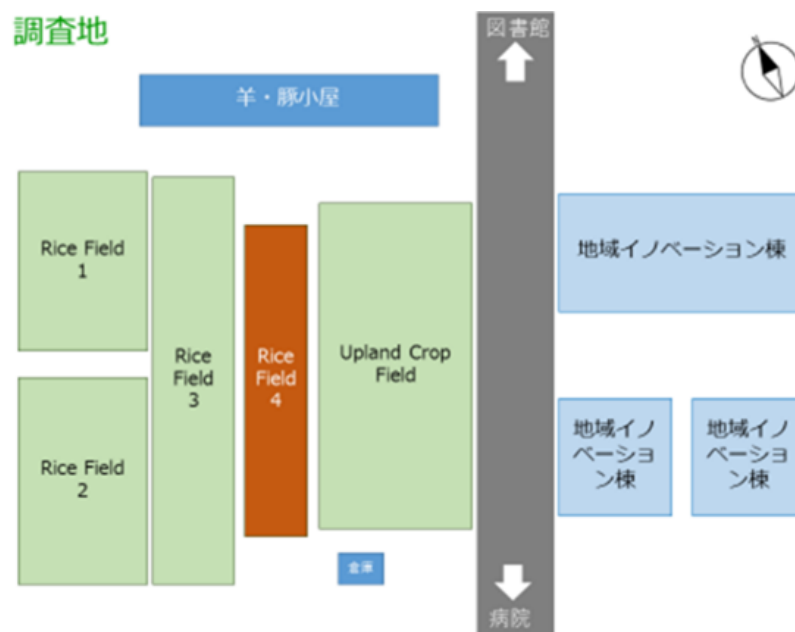


図 3.1.2 調査圃場の模式図

### 3-1-1 圃場の施肥・管理方法

2022/2/24 に気象センサーを設置し、3/16 に縦横 1.5 m の区画 10 個を作成した。区画の外周は人口畔で囲み、区画間は深さ約 15 cm まで波板を設置することで隣接区画の影響を受けないようにした。3 月 17 日に C/N 26.0 の牛糞堆肥を有機肥料として施用し、深さ 5, 15, 25 cm に Plot5 へ土中センサーを埋設した。牛糞堆肥の成分内訳を表 3.1.1、各区画への施肥量を表 3.1.2、施肥量による区画分けを図 3.1.3 に示す。

表 3.1.1 牛糞堆肥の成分内訳（現物当たり）

水分	55.2 %
灰分	6.3 %
pH (21.2℃)	8.4
電気伝導度 (25.0℃)	2.75 mS/cm
窒素全量 (N)	0.67 %
リン酸全量 (P2O5)	0.91%
カリウム全量 (K2O)	1.2 %
カルシウム全量 (CaO)	0.57 %
マグネシウム全量 (MgO)	0.37 %
C/N	26.0

表 3.1.2 各区画の施肥量

区画名	施肥量 (g/m <sup>2</sup> )	牛糞堆肥成分量 (g/m <sup>2</sup> )			化成肥料 (g/m <sup>2</sup> ) (6/1, 7/22)		
		N	P	K	N	P	K
N16	2388.1	16.0	9.5	23.8	0.0	0.0	0.0.
N8	1194.0	8.0	4.7	11.9	0.0	2.4	5.9
N4	597.0	4.0	2.4	5.9	0.0	3.6	9.0
N0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	11.9
化成N8					4.0	4.7	11.9

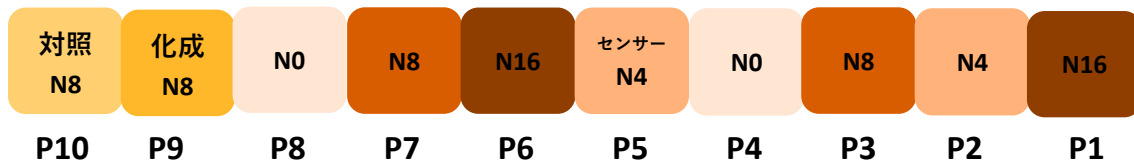


図 3.1.3 圃場の区画分け

Plot1-8 は牛糞堆肥施肥区とした。以降 Plot1 と 6 は N16 区, Plot3 と 7 は N8 区, Plot2 と 5 は N4 区, Plot4 と 8 は N0 区とする。Plot9, 10 は対照区とした。Plot9 は化成区とし、N8 区と等量の施肥を化成肥料で行った。Plot10 は無栽培区とし、N8 区と等量の施肥を牛糞堆肥で行った。施肥後は耕運機を用いて深さ約 10 cm まで牛糞堆肥をすき込み、以降は裸地として管理した。牛糞堆肥施肥前と施肥時、すき込み後の様子を図 3.1.4-3.1.6 に示す。





図 3.1.4 牛糞堆肥施肥前の様子



図 3.1.5 牛糞堆肥施肥時の様子



図 3.1.6 牛糞堆肥すき込み後の様子

5/2 に代かきを行い、Plot5 へ水深センサーを埋設した。以降は常時湛水を維持した。圃場間の波板から水漏れが起きており、隣接区画への影響が出ていた。そのため、5/17 に Plot1 と 2, 19 日に Plot3 と 4, 23 日に Plot5, 27 日に Plot6-10 の波板を深さ約 25 cm まで再設置した。5/31 に再度代かきを行い、6/1/に牛糞堆肥施肥区 (N0, N4, N8, N8 対照) に P, K を、化成区に N, P, K を施肥した。6 月 3 日にイネのコシヒカリを縦 20 cm, 横 15 cm 間隔で移植した。4 日に深さ 15, 25 cm に Plot5 へ土中水压センサーを設置した。7/22 に牛糞堆肥施肥区 (N0, N4, N8, N8 対照) に P, K を、化成区に N, P, K を施肥した。P, K 化成の量は、2 度の施肥量と牛糞堆肥に含まれる P, K の和が、N16 区の P, K 量と同じになるよう調整した。9/12 に湛水維持をやめ、16 日にイネを収穫した。

### 3-1-2 圃場試料の物理・化学性

#### 〈物理性〉

非湛水期間の 3/25, 4/20, 4/30 と湛水期間の 9/12 に、深さ 5, 15, 25 cm の Plot5 の土を 100 cm<sup>3</sup> サンプラーを用いて採土した。採取した土は、炉乾法で採取時の体積含水率  $\theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] と飽和体積含水率  $\theta_s$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>], 乾燥密度  $\rho_b$  [g<sub>soil</sub>/cm<sup>3</sup>] を測定し、変水位透水試験で飽和透水係数  $K_s$  [cm/d] の測定を行った。また、3/25, 4/20, 4/30 に採取した土は、吸引法, 加板法によって土中水圧力  $h$  [cm] に対する体積含水率を測定し、次式に示す van Genuchten モデル (以下、VG モデル) を用いて測定値を満たすようフィッティングし、水分特性曲線の作成を行った。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad \text{式 3.1.1}$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad \text{式 3.1.2}$$

ここで、 $\theta_r$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] は残留体積含水率、 $S_e$  [-] は有効飽和度、 $\alpha$  [1/cm],  $n$  [-],  $m$  (1-1/n) [-] は水分保持曲線の形状を与えるパラメータ、 $l$  [-] は間隙結合係数 (0.5) である。

$\theta_s$ ,  $\rho_b$ ,  $K_s$ , 水分特性曲線は代かき前後による大きな違いは見られなかった。そのため、表 3.1.3 に示す  $\theta_s$ ,  $\rho_b$ ,  $K_s$ , 図 3.1.7 に示す水分特性曲線を全期間統一の値として本研究に用いた。

表 3.1.3 圃場の飽和体積含水率  $\theta$ , 乾燥密度  $\rho_b$ , 飽和透水係数  $K_s$

深さ (cm)	飽和体積含水率 $\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 $\rho_b$ (g <sub>soil</sub> /cm <sup>3</sup> )	飽和透水係数 $K_s$ (cm/d)
5	0.45	1.27	1.74
15	0.45	1.45	0.22
25	0.45	1.42	1.08

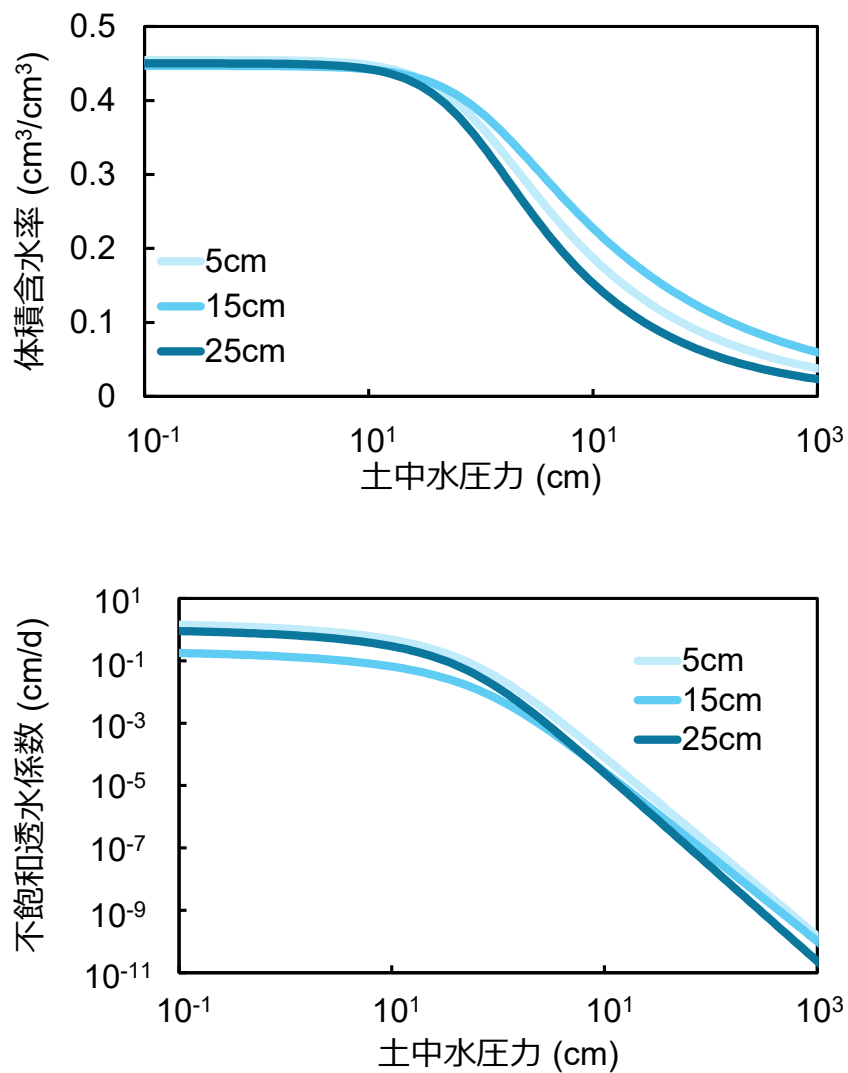


図 3.1.7 圃場の水分特性曲線と不飽和透水係数

### 〈化学性〉

3/17 の牛糞堆肥施肥前に、Plot5, 7 の深さ 0-10 cm の土を採取した。採取した土は JA に土壤診断を依頼した。測定項目は、土質, pH, 有効態リン酸 [mg/100g], 交換性カリ [mg/100g], 交換性苦土 [mg/100g], 交換性石灰 [mg/100g], リン酸吸収係数, CEC [me/100g], 仮比重である。測定結果を表 3.1.4 に示す。

表 3.1.4 Plot5, 7 の深さ 0-10 cm の化学性

区画	土質	pH	有効態 リン酸 (mg/100g)	交換性 カリ (mg/100g)	交換性 苦土 (mg/100g)	交換性 石灰 (mg/100g)	リン酸 吸収係数	CEC (me/100g)	仮比重
Plot5	沖積土	5.8	17.0	11.1	27.4	170.6	496	10.4	1.11
Plot7	沖積土	5.9	15.2	10.7	33.3	171.8	512	10.4	1.11

## 3-2 圃場試料の採取・測定方法

実験期間中、土試料とイネ試料を採取し測定を行った。ここでは、試料の採取方法と測定方法、測定結果の計算方法を示す。

### 3-2-1 土試料の採取

2022/3/17（牛糞堆肥施肥前）から 9/13（収穫 3 日前）まで、検土杖を用いた採土を行った。4 点法による採土を行い、採土間隔は隔週で行った。検土杖は約 30 cm まで突き刺し、採取した土を 4 深度 (0-2, 2-10, 10-20, 20-25 cm) に袋分けした。検土杖を図 3.2.1, 採土の様子を図 3.2.2 に示す。



図 3.2.1 検土杖



図 3.2.2 採土の様子

採土した試料は微生物の活性を停止させるために、冷凍庫で保存した。採土方法の詳細と採土日の圃場の様子は付録に記した。



### 3-2-2 土試料の $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ の測定, 換算方法

#### 〈測定方法〉

土試料のアンモニア態窒素  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 硝酸態窒素  $\text{NO}_3\text{-N}$  の濃度測定に HACH 社製の吸光度計 DR6000 (図 3.2.3) を使用した。試料には、塩化カリウム (KCl) 抽出液と水抽出液を用いて、全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  (溶存  $\text{NH}_4\text{-N}$  と吸着  $\text{NH}_4\text{-N}$  の和),  $\text{NO}_3\text{-N}$  を測定した。DR6000 では、専用の 10 mL セル内で液中の被測定物質と試薬を反応させ、変化した液色により濃度を出力する。液色の補色光の透過率を測定し、吸光度および溶液濃度に換算する。透過率の測定原理や測定方法は、付録に記した。



図 3.2.3 吸光度計 (DR6000)

#### 〈換算方法〉

DR6000 で測定している抽出液の濃度は  $[\text{mg/L}]$  である。本研究では、1 L 当たりの窒素濃度  $[\text{mmol/L}]$ ,  $1000 \text{ cm}^3$  当たりの窒素量  $[\text{mmol}/1000\text{cm}^3]$ , 単位面積当たりの窒素量  $[\text{g}/\text{m}^2]$  のいずれかを用いるため、この換算方法を示す。

$$\begin{aligned}
1 \text{ L あたりの窒素濃度 (mmol/L)} &= \frac{\text{抽出液の濃度 (mg/L)}}{\text{窒素の物質質量 (14.0067 mg/mmol)}} \\
1000 \text{ cm}^3 \text{あたりの窒素量} \left( \frac{\text{mmol}}{1000 \text{ cm}^3} \right) &= 1 \text{ L あたりの窒素濃度} \left( \frac{\text{mmol}}{\text{L}} \right) \\
&\quad \times \text{抽出倍率乾土} \left( \frac{\text{L}}{\text{g}_{\text{soil}}} \right) \times \text{乾燥密度} \left( \frac{\text{g}_{\text{soil}}}{\text{cm}^3} \right) \\
&\quad \times 1000 \\
\text{単位面積当たりの窒素量} \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right) &= 1000 \text{ cm}^3 \text{あたりの窒素量} \left( \frac{\text{mmol}}{1000 \text{ cm}^3} \right) \\
&\quad \times \text{窒素の物質質量} \left( 14.0067 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} \right) \\
&\quad \times \text{採土深さ (cm)} \div 100
\end{aligned}$$

抽出倍率乾土 [L/g<sub>soil</sub>]については以下のように求めた。このとき、水密度を 1 [g/cm<sup>3</sup>]とした。

$$\text{抽出倍率乾土} \left( \frac{\text{L}}{\text{g}_{\text{soil}}} \right) = \frac{\text{抽出液 (KCl or 水) (mL)} + \text{試料液相 (g)}}{\text{試料固相 (g)}}$$

$$\text{試料液相 (g)} = \text{試料 (g)} - \frac{\text{試料 (g)}}{\text{試料含水比} + 1}$$

### 3-2-3 イネ試料の採取

2022/6/3 (移植) から 9/16 (収穫) まで、イネの「コシヒカリ」を栽培した。採取日は 6/3 (移植), 6/20 (分けつ始期), 7/7 (分けつ活性期), 7/24 (幼穂形成期), 8/11 (出穂期), 9/13 (登熟期), 9/16 日 (収穫) である。採取する際、各区画から 2 株ずつ根ごと採取し、収穫時は各区画から 5 株ずつ刈り取った。このとき、採取による栽植密度の変化が生育に影響を与えないように、採取する株の隣接 8 方向に株があるものを採取した。移植時の様子を図 3.2.4, 移植した苗を図 3.2.5 に示す。



図 3.2.4 移植時の様子



図 3.2.5 移植したイネ（コシヒカリ）

### 3-2-4 イネ試料の生育・収量調査と換算方法

採取したイネのうち、収穫時以外の株は生育調査を、収穫時の株は収量調査を行った。

#### 〈生育調査〉

採取後、直ちに穂、葉、茎、根、枯死部に切り分け、炉乾法による乾物重の測定を行った。なお、Plot5 のイネについては切り分ける前に草丈を測定した。乾物重の測定後、細かく切り刻み暗室で保存した。乾物重、草丈は各区画 2 株ずつ測定しているため、平均値を各区画の結果とした。

### 〈元素分析〉

各部位のイネ試料の全窒素の測定に、Elementar 社の Vario EL cube 全自動元素分析装置（図 3.2.6）を使用した。元素分析機は試料中の C, H, N を燃焼し、 $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  ガスに変えることで分離する機械である。 $\text{NO}_x$  は、装置内部の還元銅により還元され、 $\text{N}_2$  として測定される。機械内の流路には一定速度でヘリウムガスを流し、そこに燃焼したガスを流し入れる。気体となった C, H, N は、流路に設置された吸湿剤や  $\text{CO}_2$  吸収管を通る際に流路から除去される。その前後の熱伝導率の変化を測定し、クロマトグラフの面積を求める。C, H, N の割合が既知のアセトアニリド ( $\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}$  (N:10.36%, C:71.09%<sub>ow</sub>, H:11.84%<sub>ow</sub>)) で 5 点、熱伝導率のクロマトグラフの面積と C, H, N の質量を検量することで、試料の熱伝導率の測定により C, H, N の質量を求めることができる。測定方法は付録に記した。



図 3.2.6 CHN 元素分析装置

### 〈収量調査〉

9/16（収穫）に採取したイネを用いて収量調査を行った。各区画から採取した 5 株はまとめて測定を行った。測定項目は穂数，全もみ数，塩水選（比重 1.06）による選別，1.7 mm ふるいによる選別，ふるいによる選別後の玄米重量，1.7 mm 以上玄米の含水比である。

### 〈換算方法〉

イネの生育調査，収量調査の結果から、窒素吸収量 [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]，収量構成要素（穂数 [ $\text{m}^2$ ]，一穂粒数，登熟歩合 [%]，1000 粒重 [g]），収量 [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]を求めた。ここでは各項目の計算方法を示す。なお、一般的な登熟歩合，1000 粒重さの計算は、塩水選後の沈んだ玄米を登熟したとみなして計算に用いるが、本実験では 1.7 mm 以上の玄米を登熟したとみなして計算した。

$$\begin{aligned} \text{各部位の窒素含有量 (g/m}^2\text{)} &= \text{各部位の乾物重 (g/株)} \times \text{栽培間隔 (株/m}^2\text{)} \\ &\quad \times \text{各部位の窒素含有割合 (\%)} \div 100 \end{aligned} \quad \text{式 3.2.1}$$

$$\begin{aligned} \text{窒素吸収量 (g/m}^2\text{)} &= \text{穂の窒素含有量 (g/m}^2\text{)} + \text{葉の窒素含有量 (g/m}^2\text{)} \\ &\quad + \text{茎の窒素含有量 (g/m}^2\text{)} \\ &\quad - \{ \text{6月3日の葉と茎の窒素含有量 (g/m}^2\text{)} \} \end{aligned} \quad \text{式 3.2.2}$$

$$\text{穂数 (/m}^2\text{)} = \text{穂数 (/株)} \times \text{栽培間隔 (株/m}^2\text{)} \quad \text{式 3.2.3}$$

$$\text{一穂粒数} = \text{全もみ数} / \text{穂数} \quad \text{式 3.2.4}$$

$$\text{登熟歩合 (\%)} = \text{1.7 mm 以上玄米重量 (g)} / \text{1.7 mm 以下玄米重量 (g)} \quad \text{式 3.2.5}$$

$$\begin{aligned} \text{1000 粒重 (g)} &= \frac{\text{1.7 mm 以上玄米重量 (g)}}{\text{1.7 mm 以上玄米数}} \times \frac{100 - \text{1.7mm 以上玄米含水比}}{100 - 15} \\ &\quad \times 1000 \end{aligned} \quad \text{式 3.2.6}$$

$$\begin{aligned} \text{収量 (g/m}^2\text{)} &= \text{穂数 (/m}^2\text{)} \times \text{一穂粒数} \times \text{登熟歩合 (\%)} \\ &\quad \times \text{1000 粒重 (g)} / 1000 \end{aligned} \quad \text{式 3.2.7}$$

### 3-3 圃場に設置したセンサー

本実験では圃場にセンサーを設置し、気象、土中のモニタリングを行った。ここでは、使用したセンサーの測定項目や特徴、センサーのデータを回収するために用いたデータロガーについて示す。

#### 3-3-1 気象センサー（ATOMOS-41）

気象センサーには AINEX 株式会社の ATOMOS-41 複合型気象計測ユニットを使用した（図 3.3.1）。測定項目は、日射量、降水量、蒸気圧、相対湿度、気温、大気圧、水平風速、風向などである。2022/2/24 に Rice Field1, 2, 3（図 3.1.2）の間に高さ 2 m で設置した。設置する際は、水平器を確認（X, Y 方向共に±2 度以内）すること、センサーに刻印された「N」を北に向ける必要がある（図 3.3.2）。また、測定期間中に適宜センサーカバーを取り外し、ドリップカウンターを掃除することで降水量の測定不備を無くす必要がある。本実験では 4/11 10:20-4/12 16:20 の全項目、7/6 13:30-7/18 13:50 の相対湿度、8/4 17:20-8/5 7:50, 8/17 5:50-9:00 の風速は測定が出来なかった。そのため、日射量以外は津市の AMEDAS データを使用した。日射量は 4 月の名古屋の日射量と ATOMOS の日射量を比較し、時間ごとのバラつきの平均値を求めた。その後、欠損期間における名古屋の日射量からバラつきの平均値を足すことで圃場の日射量とした。



図 3.3.1 ATOMS 設置時と設置後の様子



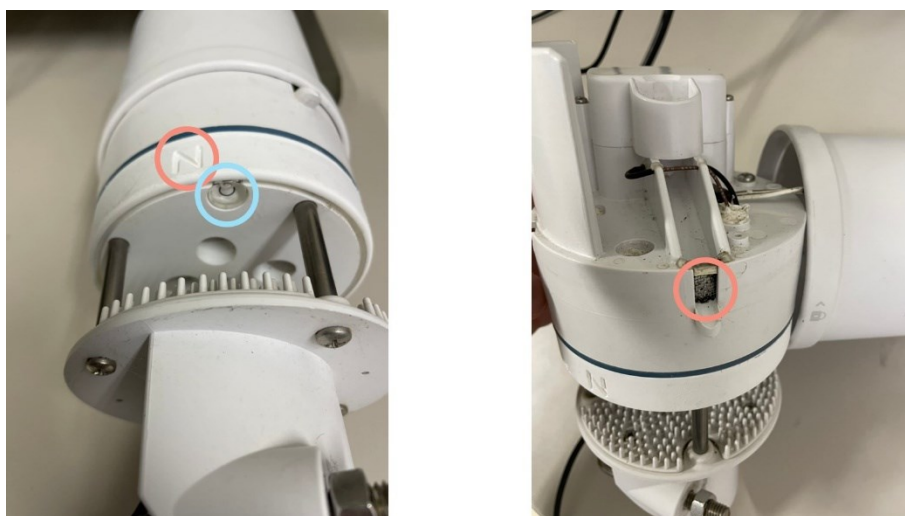


図 3.3.2 (左図) ATMOS41 の水平器 (水色) と刻印「N」 (赤枠) と、  
(右図) ドリップカウンター (赤枠)

### 3-3-2 Em60 データロガー

気象センサーのデータ回収には AINEX 株式会社の Em60 データロガーを用い、10 分間隔で測定した。設置する際は、ロガー内に除湿剤を入れた。パソコンとロガー間を Micro USB Type-B (2.0)で繋ぎ、ソフト Zentra Utility を用いてデータを回収した。ロガーの蓋側には太陽光パネルが備え付けられているため蓄電池を用いることが出来るが、天候の影響でバッテリー残量が低下する場合がある。その場合は、ソフトを用いてバッテリー残量を確認し、電池の交換を行う必要がある。そのため、1 週間に 1 度はデータを回収しバッテリー残量を確認する必要がある。

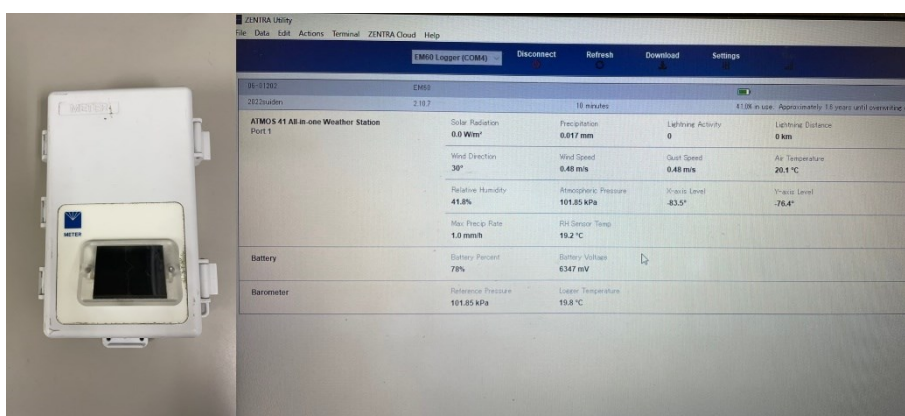


図 3.3.3 Em60 データロガー (左図) と Zentra Utility (右図)

### 3-3-3 土中センサー（TEROS12）

土中センサーには METER 社の TEROS12 を用いた（図 3.3.4）。測定項目は、土中温度、体積含水率、電気伝導度（EC）である。2022/3/17 に Plot5 に深さ 5, 15, 25 cm に設置した。設置する際は、地面に対し平行に設置する必要がある。また、先端が尖っているため、ケガをしないよう注意する必要がある。本研究では、設置する前に適当な土の測定を行い、センサー毎にバラつきがないか確認をした。その後、牛糞堆肥施用前の 3/2 に、Plot5 で全てのセンサーを同一深度に設置し、計測エラーが起きないか確認した（図 3.3.5）。また、体積含水率は直接測定せず、測定した土中の誘電率から次の Topp 式を用いて体積含水率に変換した。

$$\theta_{Topp} = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \times \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \times \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \times \varepsilon^3 \quad \text{式 3.3.1}$$

ここで  $\theta_{Topp}$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] は Topp 式で求めた体積含水率、 $\varepsilon$  [-] は土の比誘電率である。

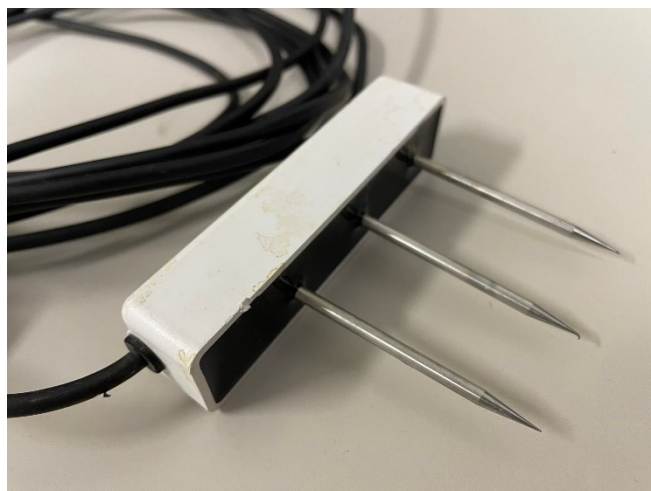


図 3.3.4 TEROS12





図 3.3.5 3/2（牛糞堆肥施用前）に圃場に設置した様子

各深さの  $\theta_{\text{Topp}}$  について補正を行った。4/30 に 100 cm<sup>3</sup> サンプラーを用いて採土した土の体積含水率を真値とし、以下の式を用いて  $\theta_{\text{Topp}}$  を補正した体積含水率  $\theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]とした。このとき、 $\theta$  の飽和体積含水率  $\theta_s$  は同日の土の飽和体積含水率とした。

$$\theta = \frac{\text{サンプラーの体積含水率}}{\text{サンプラーと同時刻における}\theta_{\text{Topp}}} \times \theta_{\text{Topp}}$$

#### 3-3-4 ZL6 データロガー

TEROS12 のデータ回収には METER 社の ZL6 データロガーを用い、10 分間隔で測定した。データの回収方法や設置後の注意点などは Em60 データロガーと同じである。



図 3.3.6 ZL6 データロガー

### 3-3-5 テンシオメータ（HG-2100AEL）

土中水圧力を測定するために、株式会社モルのテンシオメータ（HG-2100AEL）を用いた（図 3.3.7）。2022/6/4 に Plot5 の深さ 15, 25 cm に設置した。テンシオメータは圧力計と多孔質セラミックカップをチューブでつないだものである。測定するには、圧力計の先端から、チューブ、セラミックカップの部分まで全て脱気水で満たす必要がある。圧力計で測定された電圧から検量線を用いて土中水圧力を求めた。このセンサーは新品のため、説明書に同封されていた検量結果を基に検量線を作成した（図 3.3.8）。以下に検量線を示す。

$$15 \text{ cm 深 (\#1588)} \quad h = -0.9832x + 2000.1$$

$$25 \text{ cm 深 (\#1589)} \quad h = -0.9807x + 2000$$

ここで  $h$  [cm] は土中水圧力,  $x$  [mV] は電圧である。



図 3.3.7 テンシオメータ（上：#1588，下：#1589）

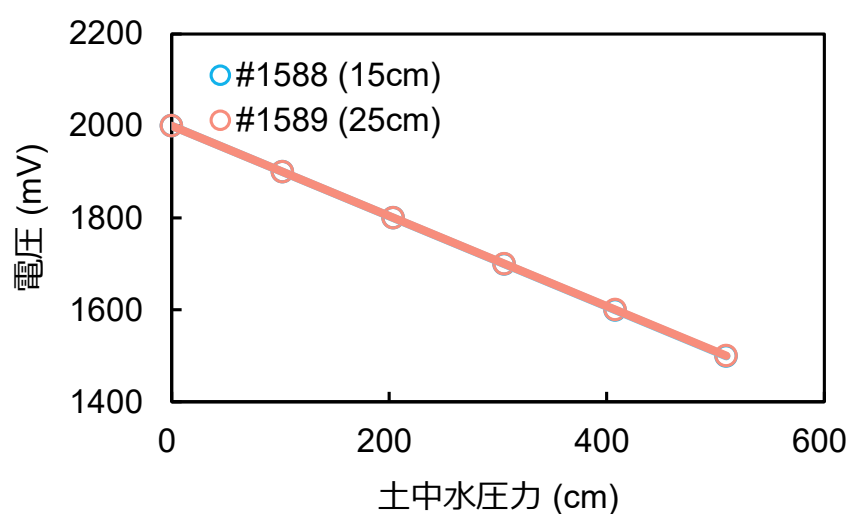


図 3.3.8 テンシオメータの検量線

### 3-3-6 TDR センサー (Campbell Scientific CS650)

水深を測定するために、TDR センサー (Campbell Scientific CS650) を用いた (図 3.3.9)。2022/5/2 にヘッド部分を下向きに土へ差し込み、プローブが見えるように Plot5 へ設置した。このセンサーは直径 3.2 mm, 長さ 300 mm のステンレス製のロッドが 32 mm 間隔で 2 本あり、ヘッド部分から伸びている形状の土壌水分センサーである。土に差し込んだプローブに電磁波を送信し、プローブの先端からの反射波を得る。この電磁波が伝わる速度から土壌の誘電率を計算し、Topp 式 (式 3.3.1) を用いて体積含水率を求めることが出来る。本実験では水深を測定するために用いたため、ある日のある時間の水深をものさしで測り、誘電率と測定した水深の関係から検量線を作成し、以下の検量式を用いて水深へと換算した。

$$y = 28.715x - 2.1105$$

ここで  $x$  [-] は土の比誘電率,  $y$  [cm] は水深である。



図 3.3.9 TDR センサー

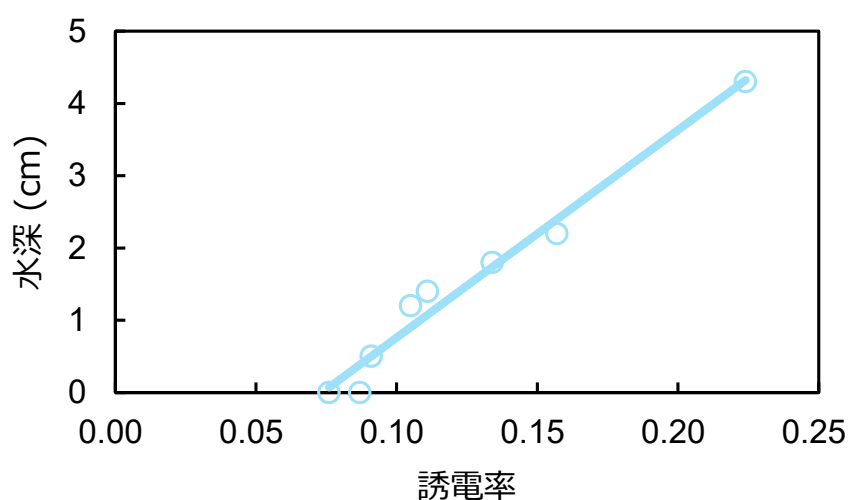


図 3.3.10 TDR センサーの検量線

### 3-3-7 CR1000 データロガー

テンシオメータ，TDR センサーのデータ回収には Campbell Scientific の CR1000 データロガーを用い、10 分間隔で測定した。データロガーはバッテリーにつないで接続し、水で濡れないよう除湿剤を入れたクーラーボックスに入れ、屋外に設置した。また、バッテリー切れを防ぐため、バッテリーは太陽光パネルに繋いだ。



図 3.3.11 CR1000 データロガー

### 3-3-8 タイムラプスカメラ

イネの成長の様子を観察するためにタイムラプスカメラを用いた。2022/6/1，15 時頃に Plot5 が撮影できる場所に設置し、1 日間隔で撮影した。撮影途中で電池が切れ、7/25（幼穂形成期 1 日後）まで撮影できた。撮影映像は容量の都合上、研究室の Tera Station に載せる。



図 3.3.12 タイムラプスカメラ

### 3.4 センサーの測定結果

ここでは、センサーで測定した結果を示す。

#### 3-4-1 気象データ

気象センサーで測定した日平均の (a) 日射量 [ $\text{W/m}^2$ ], (b) 気温 [ $^{\circ}\text{C}$ ], (d) 相対湿度 [%], (e) 風速 [ $\text{m/s}$ ], (f) 大気圧 [ $\text{kPa}$ ], 日積算の (c) 降水量[ cm]を図 3.4.1, 各月の風向頻度割合 [%] (16 方向) を図 3.4.2 に示す。

(a) 日射量は、晴天日に比べて降雨日は低くなる傾向がみられた。3 月までは、最大値が  $200 \text{ W/m}^2$  に満たなかったが、4 月の晴天日は概ね  $200 \text{ W/m}^2$  を超えた。5 月末までは、気温の上昇に伴い増加した。6 月は梅雨の影響で全体的に減少した。8 月以降にかけて全体的な減少傾向がみられた。

(b) 気温は、3/11/まで  $10^{\circ}\text{C}$  に満たなかったが、3 月末にかけて  $11.5^{\circ}\text{C}$  まで増加した。4 月も日数経過に伴い増加し、4/26 は  $20.5^{\circ}\text{C}$  だった。5/22 にかけて、 $17.0^{\circ}\text{C}$  を境に増減しつつ、以降は  $20^{\circ}\text{C}$  を概ね超えた。6/23 以降は  $25^{\circ}\text{C}$  を概ね超え、平均  $27.1^{\circ}\text{C}$  で一定となった。

(c) 降水量は 4/4-13 にかけて長期の無降水期間が続いたが、以降の非湛水期間 (-5/1) では、乾燥期間は見られなかった。

(d) 相対湿度は、非湛水期間では増減幅が大きく、最大 5/13 で  $94.8\%$ , 最小 5/3 で  $53.8\%$ , 平均  $73.5\%$  だった。湛水期間 (5/2-) 以降は増減幅が少なく、平均  $81.8\%$  と非湛水期間より大きくなった。

(e) 風速は、6/14 まで増減幅が大きく、最大 4/1 で  $3.1 \text{ m/s}$  だった。6/15 以降は増減幅も小さく、平均  $0.9 \text{ m/s}$  だった。

(f) 大気圧は、大きな増減は見られず、平均  $101.2 \text{ kPa}$  で一定だった。

各月の風向頻度は、5 月までは北風が大半を占めていた。6 月以降は南南東からの風が大半を占めていた。

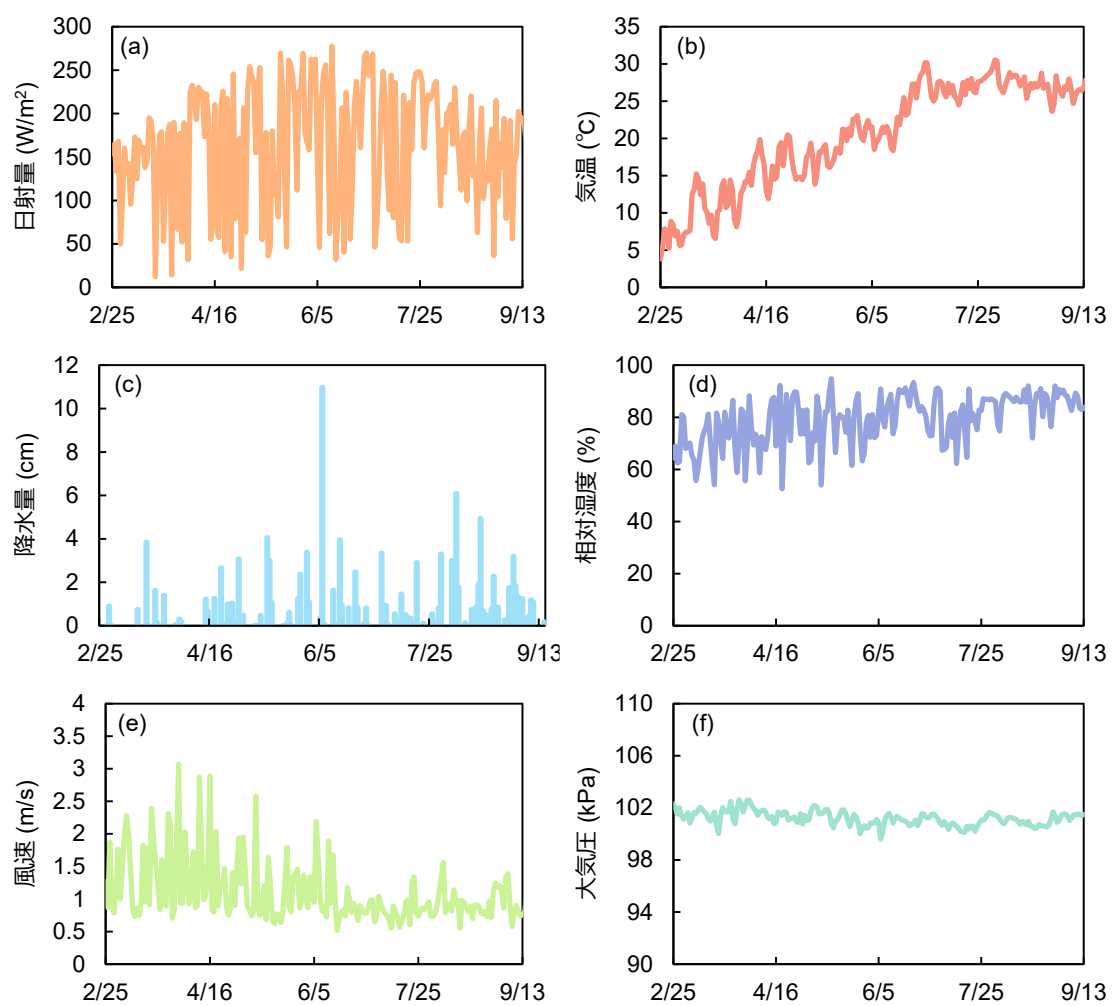
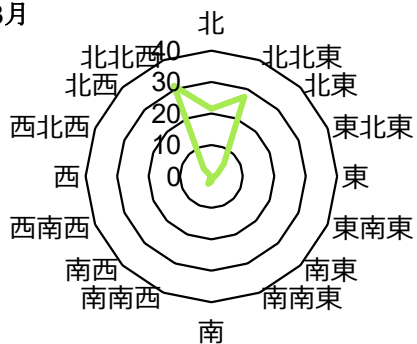


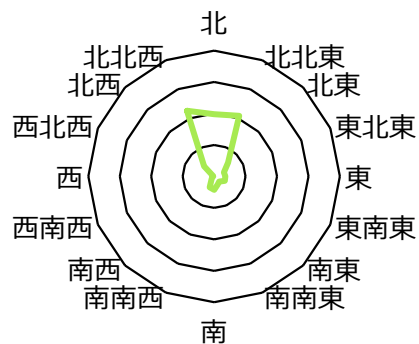
図 3.4.1 気象データの測定結果

(a : 日射量, b : 日平均気温, c : 日積算降水量, d : 日平均相対湿度, e : 日平均風速,  
f : 日平均大気圧)

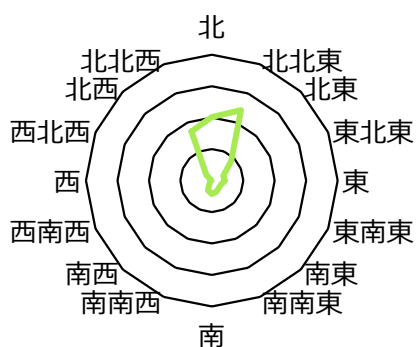
2, 3月



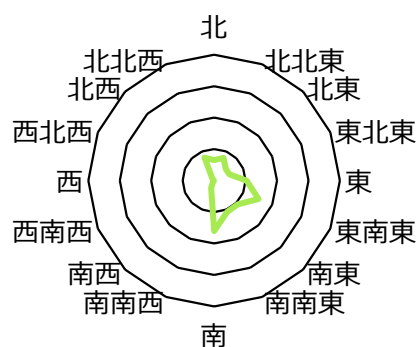
4月



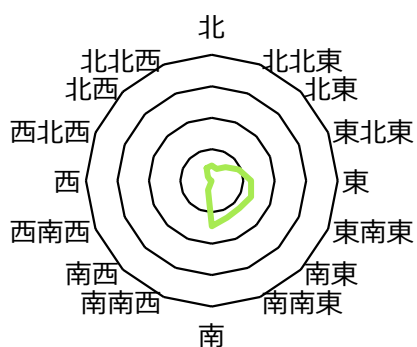
5月



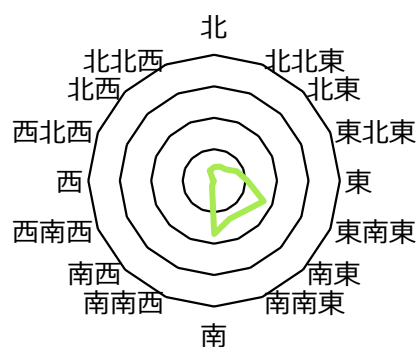
6月



7月



8月



9月

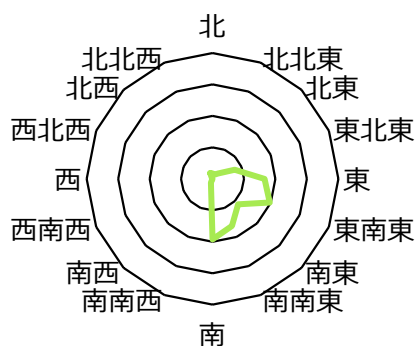


図 3.4.2 各月の風向頻度割合（16 方向における割合）

### 3-4-2 土中データ

土中に埋設したテンシオメータで測定した土中水圧力  $h$  [cm] の日平均を図 3.4.3, 土中センサーで測定した土中温度  $T_{\text{soil}}$  [°C], 体積含水率  $\theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>], 電気伝導度 EC [mS/cm] の日平均を図 3.4.4, 土中センサー回収時の様子を図 3.4.5 に示す。

$h$  は、常時深さ 25 cm の方が深さ 15 cm より 0 に近く、濡れていることがわかる。7/3, 11, 17 で両深度ともわずかに乾燥しており、深さ 15 cm は 27.8, 27.0, 35.0 cm, 深さ 25 cm は 25.5, 25.3, 30.6 cm だった。

$T_{\text{soil}}$  は、深さによる違いは見られず、3 月下旬から 6 月下旬にかけて増加した。また、増減の傾向や値含め、概ね気温と同じ値となった。

$\theta$  は、4/4-13 の無降水期間で乾燥しており、深さ 5, 15, 25 cm は 4/13 で 0.16, 0.29, 0.34 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> と、深度が浅いほど乾燥していた。湛水期間 (5/2-) 以降は、概ね全深度で飽和を維持していた。6/4 以降は深さ 25 cm の方が深さ 15 cm より大きく、テンシオメータと同じ結果であることがわかる。8 月以降にかけて  $\theta$  はわずかに減少しているが、これは図 3.4.5 から根がセンサーに絡まった影響だと考えられる。

EC は非湛水期間 (-5/1) まで、深さ 15, 25 cm より深さ 5 cm が小さく、深さ 15, 25 cm の違いは見られなかった。また、日数経過にともない徐々に増加していき、深さ 5, 15, 25 cm はそれぞれ 0.13, 0.15, 0.13 mS/cm まで増加した。湛水期間以降も徐々に大きくなり、6/2 から 6/4 にかけて、深さ 5 cm から順に 0.35, 0.34, 0.41 mS/cm と急激に増加した。これは、代かきや、移植による圃場の出入りが頻発したためと考えられる。移植以降は、深さ 15, 25 cm より深さ 5 cm の方が大きく、深さ 15, 25 cm の違いは見られなかった。また、大きな増減を伴いつつも概ね増加し、9/13 は全深度で 0.40 mS/cm となった。

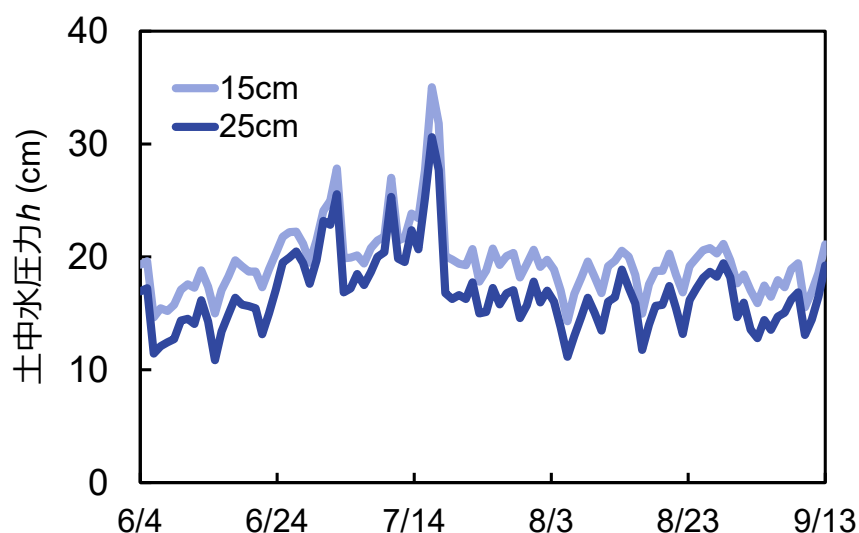


図 3.4.3 テンシオメータの測定結果



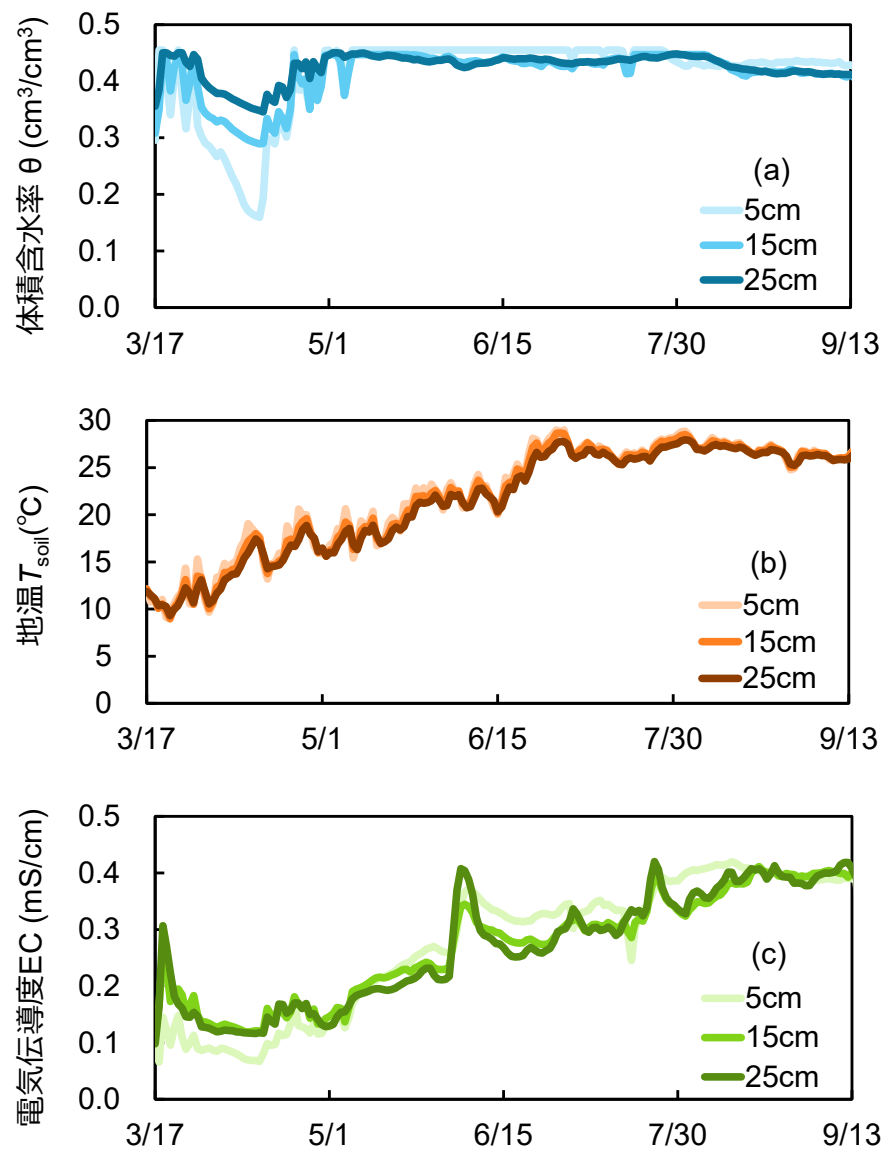


図 3.4.4 土中センサーの測定結果

(a : 日平均体積含水率, b : 日平均地温, c : 日平均電気伝導度)



図 3.4.5 土中センサー回収時の様子

### 3-4-3 水深データ

TDR センサーで測定した水深 [cm]を図 3.4.6, 時刻 0:00 の水深の日変化量 [cm/d]を図 3.4.7 に示す。

湛水期間の非栽培期間 (5/2-6/2) は湛水が出来ていないことも多々あった。栽培期間以降 (6/3-) は、概ね湛水を維持できていたが、7/2 15:40-7/3 12:20, 7/11 11:50-7/12 7:30, 7/15 21:50-7/19 5:10 は湛水を維持できていなかった。これは、図 3.4.3 の深さ 15, 25 cm の土中水圧力  $h$  の増加日と一致していた。

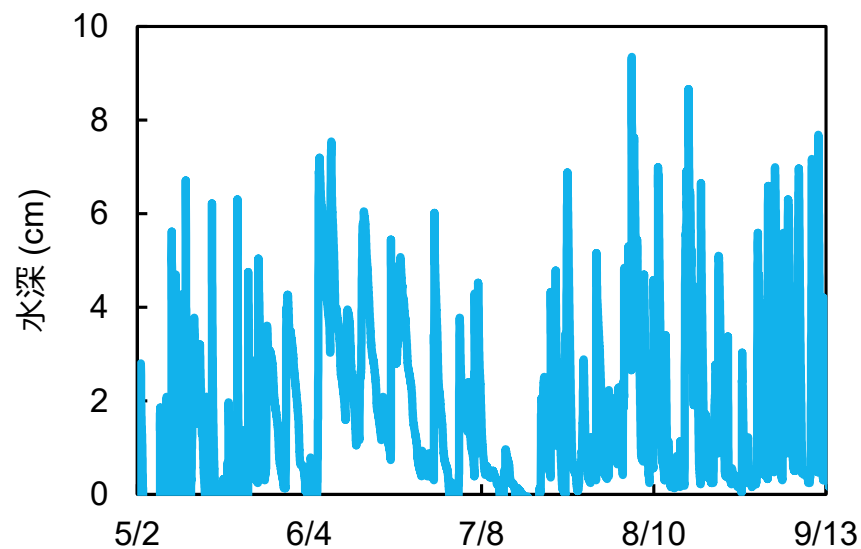


図 3.4.6 TDR センサーの測定結果

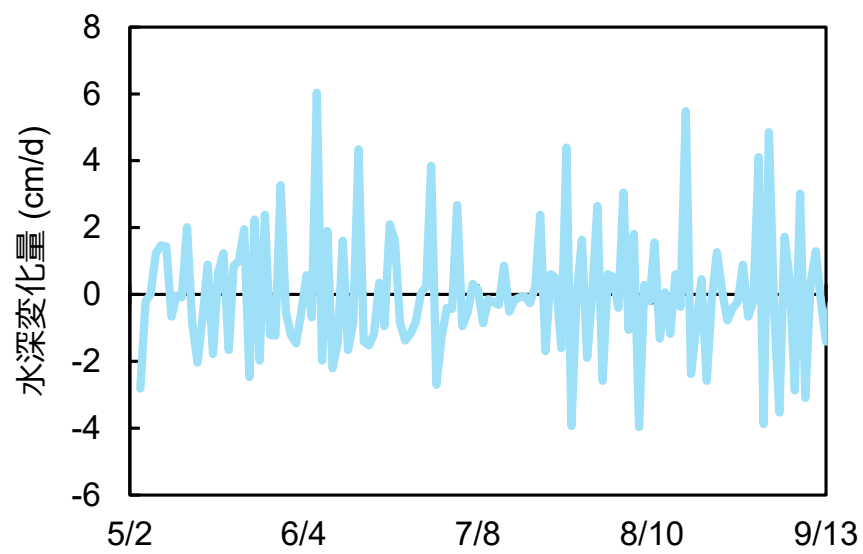


図 3.4.7 時刻 0:00 の水深の日変化量

### 3.5 イネの測定、計算結果

ここでは、採取したイネの測定結果、計算結果を示す。収穫（9/16）以外は2株ずつ、収穫は5株ずつ各区画から採取しており、平均した結果を各区画の結果とする。また、同一施肥量区画（N0, N4, N8, N16区）毎に平均した結果を、各施肥量の結果とする。

#### 3-5-1 生育調査

各生育段階に採取したイネの部位毎（穂、葉、茎）、地上部（各部位の和）乾物重 [g/m<sup>2</sup>] の各区画、施肥量毎の結果を図 3.5.1, Plot5（N4区）の草丈を図 3.5.2 に示す。

穂は、収穫にかけて増加し、N8区が 545 g/m<sup>2</sup> と最も大きく、次いで化成 N8 区の 523 g/m<sup>2</sup> だった。N16, N4, N9区と小さくなり、N0区は 380 g/m<sup>2</sup> だった。

葉は、分けつ始期（6/20）までほぼ増加しなかったが、出穂期（8/11）にかけて概ね線形で増加した。N16, N8化成, N8, N4, N0区と小さくなり、それぞれ 179, 172, 168, 148, 148 g/m<sup>2</sup> だった。収穫にかけて減少し、全区画平均して 63 g/m<sup>2</sup> 減少した。

茎は、幼穂形成期（7/24）まで葉と同じ増加傾向を示した。出穂期にかけて大きく増加し、N16, N8, N8化成, N4, N0区の順で小さく、それぞれ 447, 444, 380, 396, 395 g/m<sup>2</sup> だった。収穫にかけて N8化成区以外は減少し、全区画平均して 72 g/m<sup>2</sup> 減少した。

地上部乾物重は、収穫にかけて増加割合が大きくなった。幼穂形成期までは施肥による大きな違いは見られなかった。出穂期は N16, N8, N8化成, N0, N4区の順で小さく、それぞれ 716, 704, 640, 630, 623 g/m<sup>2</sup> だった。これは、茎の乾物重が大きく影響していると考えられる。収穫は N8, N8化成, N16, N4, N0区の順で小さく、それぞれ 1055, 1048, 953, 842, 733 g/m<sup>2</sup> だった。

草丈は、出穂期まで一定で増加し、99.0 cm だった。収穫にかけてわずかに増加し、106.6 cm だった。

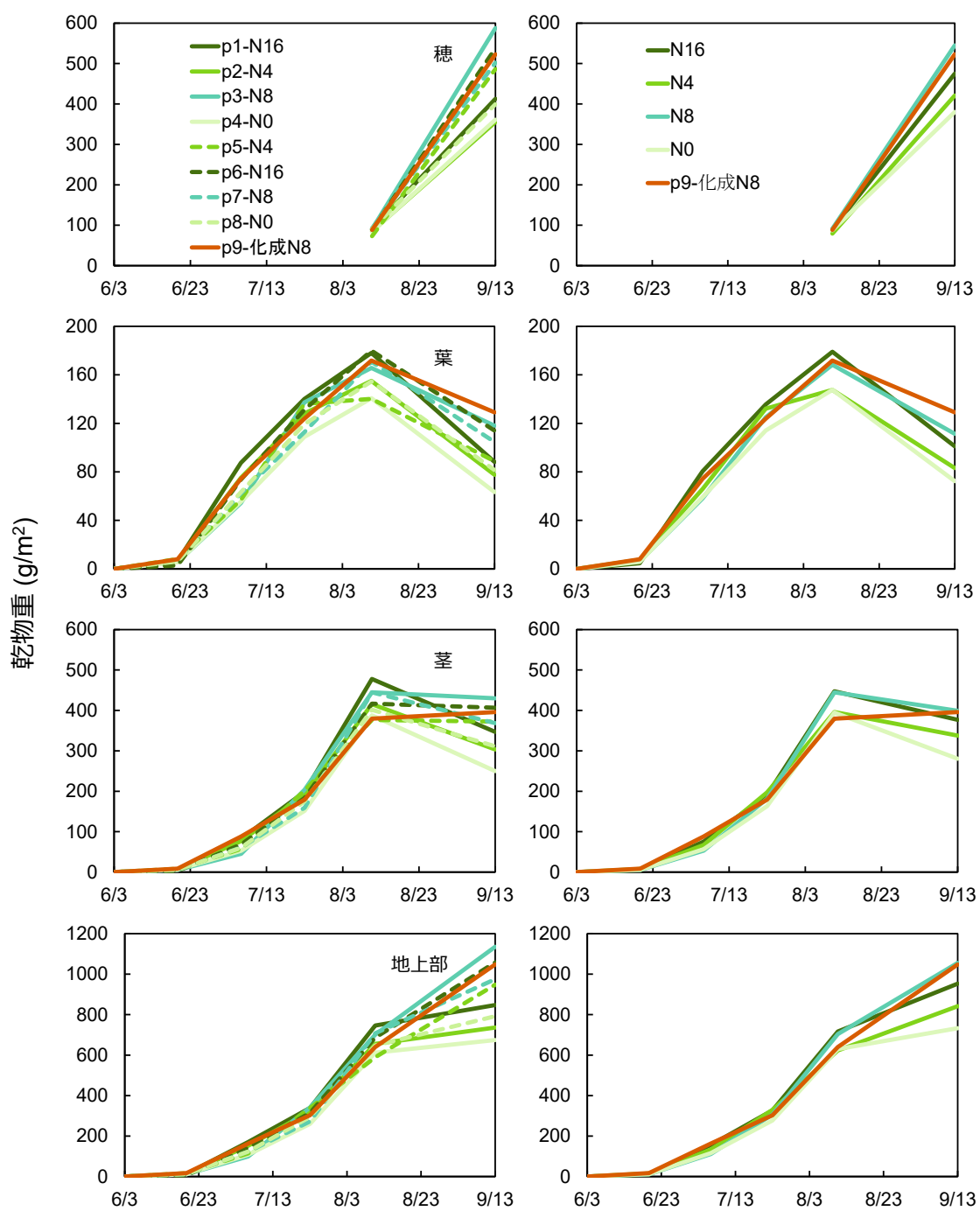


図 3.5.1 イネの乾物重の測定結果  
(左側は各区画, 右側は施肥量毎)

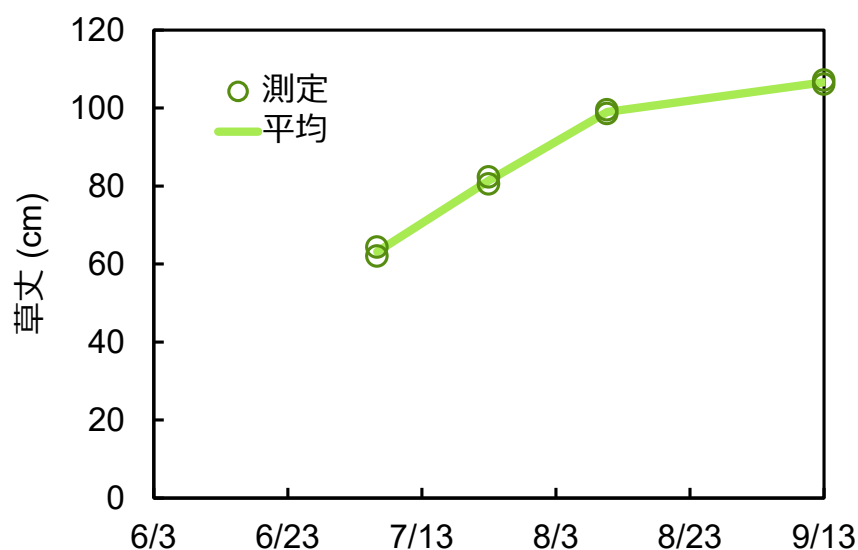


図 3.5.2 Plot5 (N4 区) の草丈の測定結果

### 3-5-2 元素分析

各生育段階に採取したイネの、区画毎と施肥量毎の部位毎の窒素含有割合 [%]を図 3.5.3, 炭素含有割合 [%]を図 3.5.4 に示す。

窒素含有割合は、茎より葉の方が高く、葉の大小関係は概ね N8 化成 > N16 > N8 > N4 = N0, 茎の大小関係は概ね N8 化成 > N16 > N4 > N0 > N8 だった。両部位とも日数経過に伴い概ね線形で減少した。穂は、出穂期から収穫期にかけ増加し、N8 化成, N4, N8, N16, N0 区の順で小さく、それぞれ 1.42, 1.21, 1.21, 1.14, 1.09 %だった。

炭素含有割合は、葉は増減があるものの概ね約 43 %だった。また、牛糞堆肥施用量による違いは見られなかった。茎は、出穂期にかけて増加し、収穫時まで概ね一定だった。収穫時の全区画のバラつきは±1.1 %で、平均値は 41.5 %だった。穂は出穂期から収穫にかけ大きく増加した。区画によるバラつきはなく、収穫時の平均は 45.0 %だった。

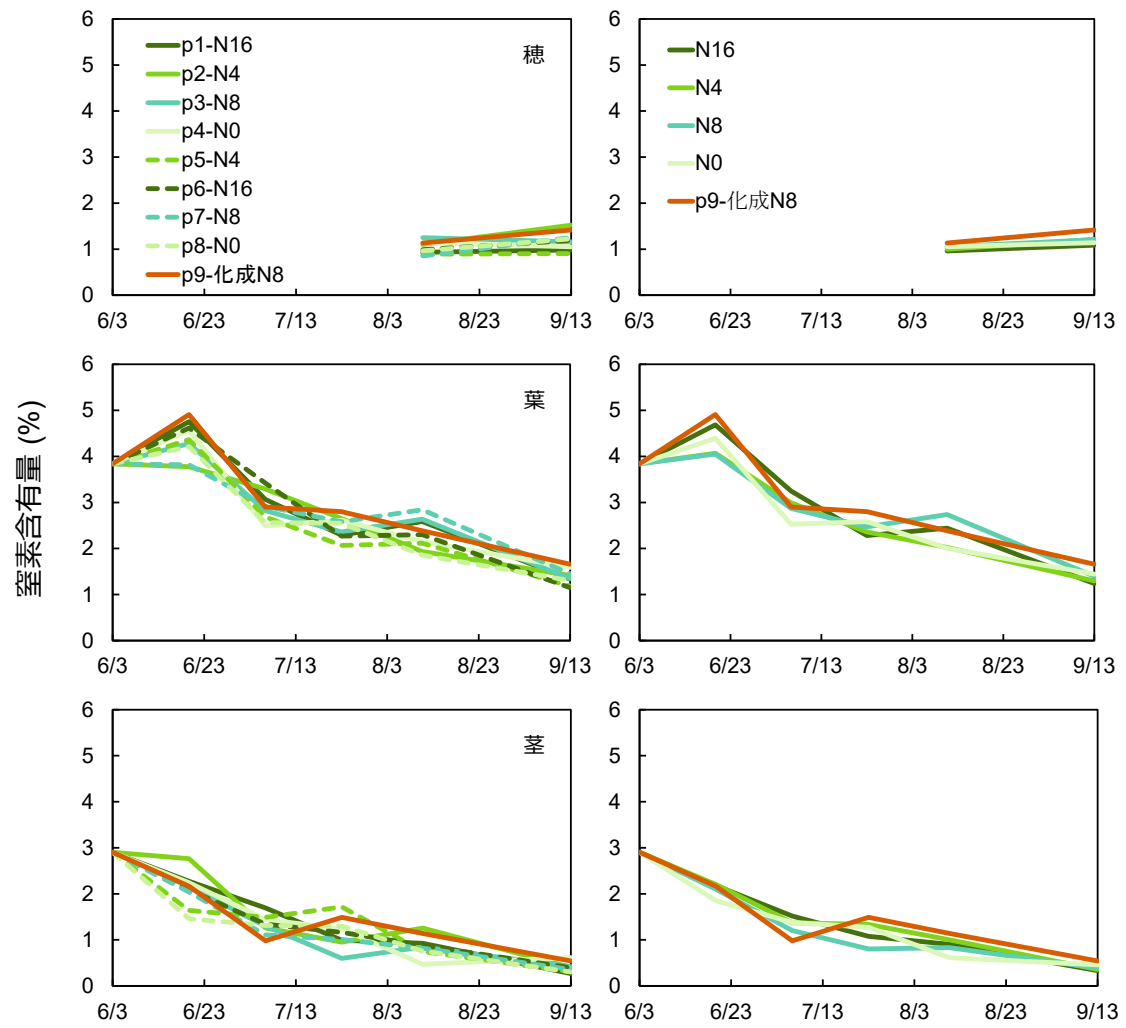


図 3.5.3 イネの窒素含有割合の測定結果  
(左側は各区画, 右側は施肥量毎)

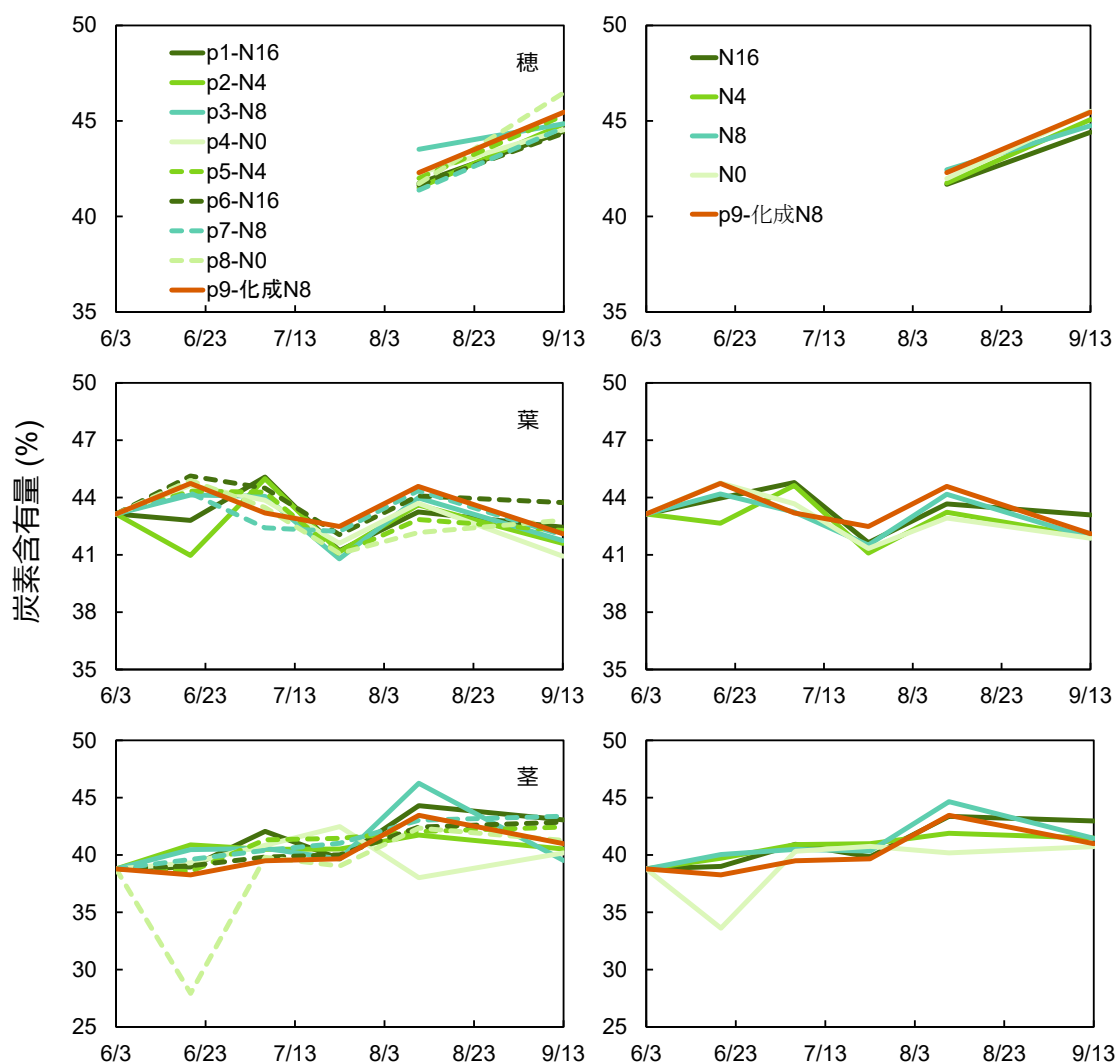


図 3.5.4 イネの炭素含有割合の測定結果  
(左側は各区画，右側は施肥量毎)

### 3-5-3 窒素吸収量

各部位，施肥量毎の地上部の窒素吸収量  $[g/m^2]$  の積み上げを図 3.5.5，N0 区と比較した結果を図 3.5.6 に示す。施肥量毎の地上部の窒素吸収量は、各区画の地上部の窒素吸収量を求めてから平均化した。このとき、施肥量毎の地上部の窒素吸収量は、他区画や前後の地上部の窒素吸収量の結果との整合性から、1 部の各部位の窒素吸収量については、平均値ではなく区画毎の窒素吸収量を用いた。

施肥量毎の窒素吸収量は、分けつ始期 (6/20) までほとんど増加せず、幼穂形成期 (7/24) まで、葉，茎の窒素吸収量は概ね 1 : 1 だった。出穂期では、穂は平均  $0.9 g/m^2$  と部位としての窒素吸収量は少なかったが、収穫にかけて転流が生じ、大半の窒素吸収量を穂が占めているのが分かる。



N0 区と比較した牛糞堆肥施用の窒素吸収量は、6/20 までわずかしき見られなかった。7/7 は N16-N0, N8-N0, N4-N0 区でそれぞれ 1.4, 0.3, 0.3 g/m<sup>2</sup> と N16-N0 区だけ大きく増加し、7/24 は 0.5, 0, 0.2 g/m<sup>2</sup> と N0 区との違いはみられなかった。7/24 から出穂期にかけて大きく増加し、そこから収穫にかけて大きな変化はなかった。収穫時の窒素吸収量の増加量は、N8 化成, N8, N16, N4 区の順で小さく、それぞれ 5.4, 3.1, 3.0, 0.8 g/m<sup>2</sup> だった。

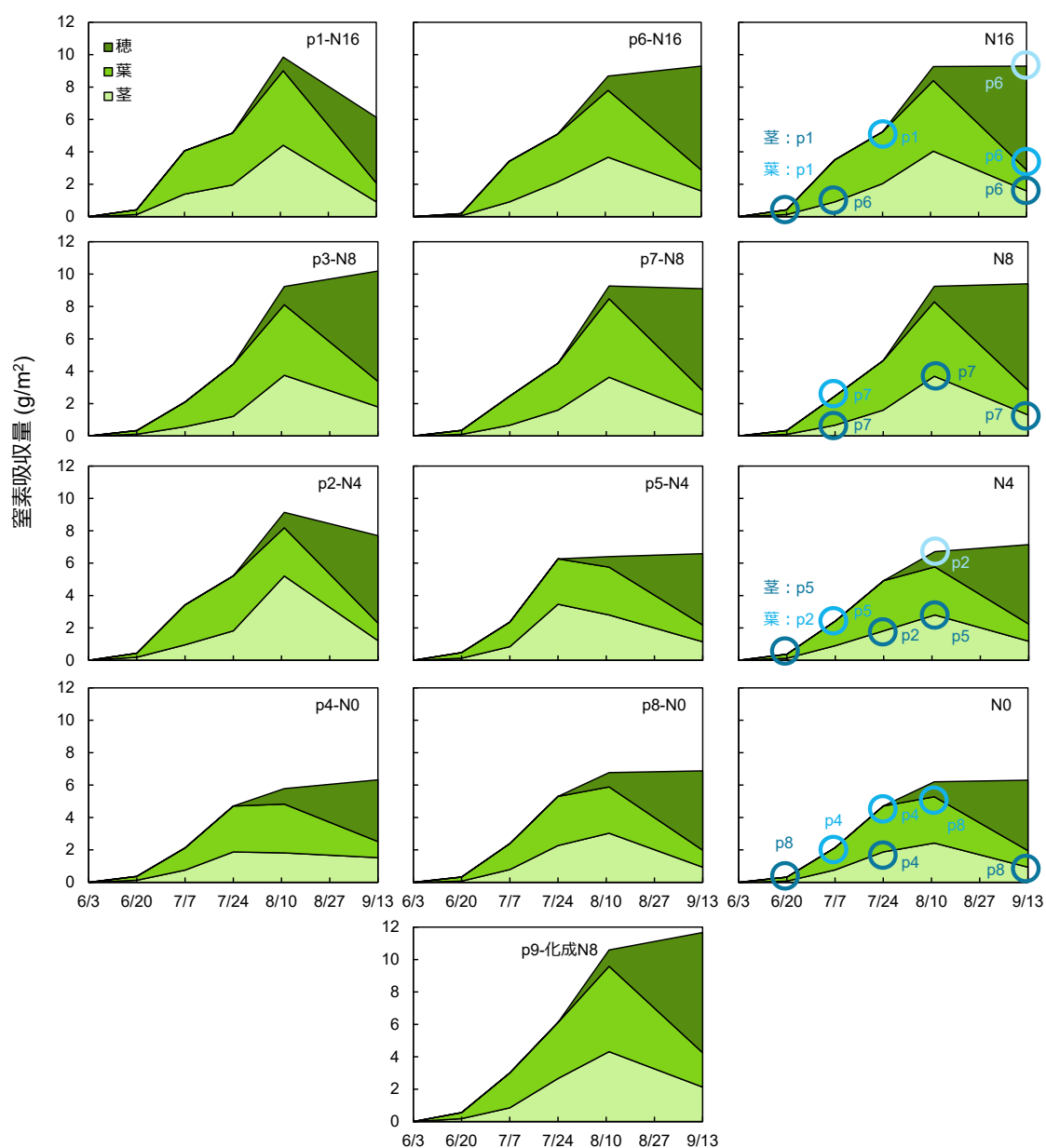


図 3.5.5 各部位の窒素吸収量積み上げ  
(左 2 図は各区画, 右図は施肥量毎)

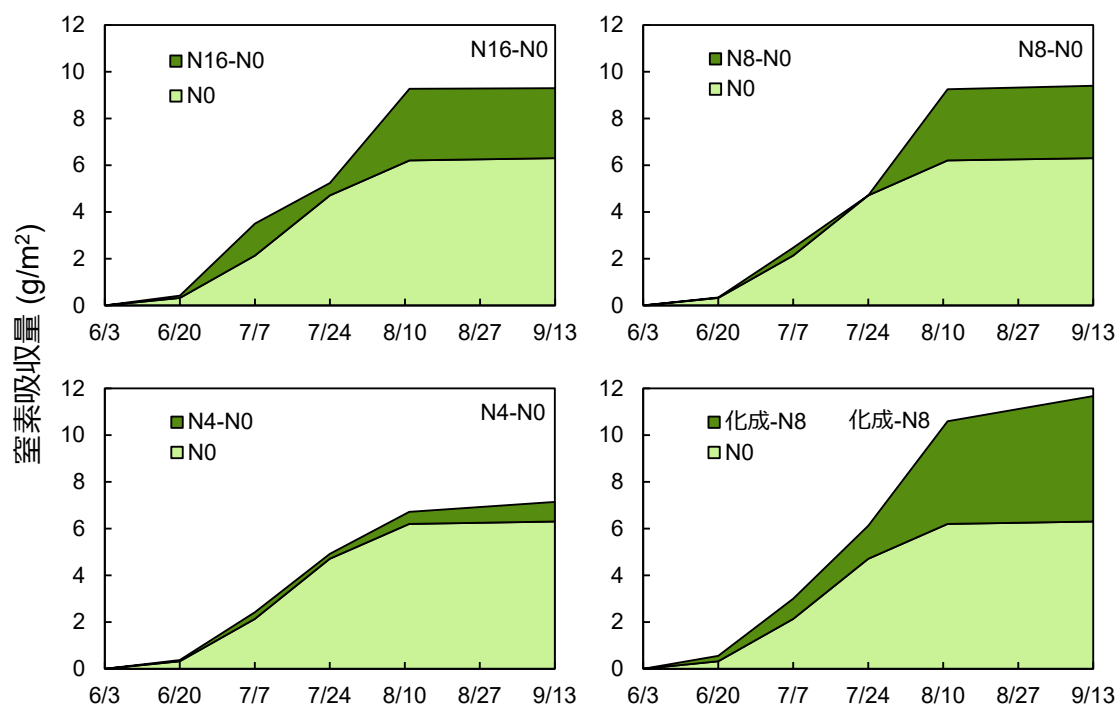


図 3.5.6 地上部乾物重の窒素吸収量積み上げ（N0 区と比較）

### 3-5-4 収量調査

各区画，施肥量毎の収量構成要素（穂数  $[\text{m}^2]$ ，一穂粒数，登熟歩合  $[\%]$ ，1000 粒重  $[\text{g}]$ ）を図 3.5.7，収量  $[\text{g}/\text{m}^2]$ を図 3.5.8 に示す。

穂数は、牛糞堆肥施用による違いは見られず、化成肥料の施用による効果がみられた。

一穂粒数は、N4 区以外は牛糞堆肥施用による違いは見られず、N8 化成区では減少した。

登熟歩合は、牛糞堆肥施用区は 99 %だったが、N8 化成区では 98.6 %と小さかった。

1000 粒重は、N0 区から N16 区にかけて減少し、N8 化成区では N4 区と同じだった。

収量は、N0 区に対し N4 区が小さく、N8，N16 区は大きかった。また、N8，N16 区の違いは見られなかった。これは、一穂粒数が大きく影響していると考えられる。N8 化成区はどの区画より大きかった。これは、穂数が大きく影響していると考えられる。

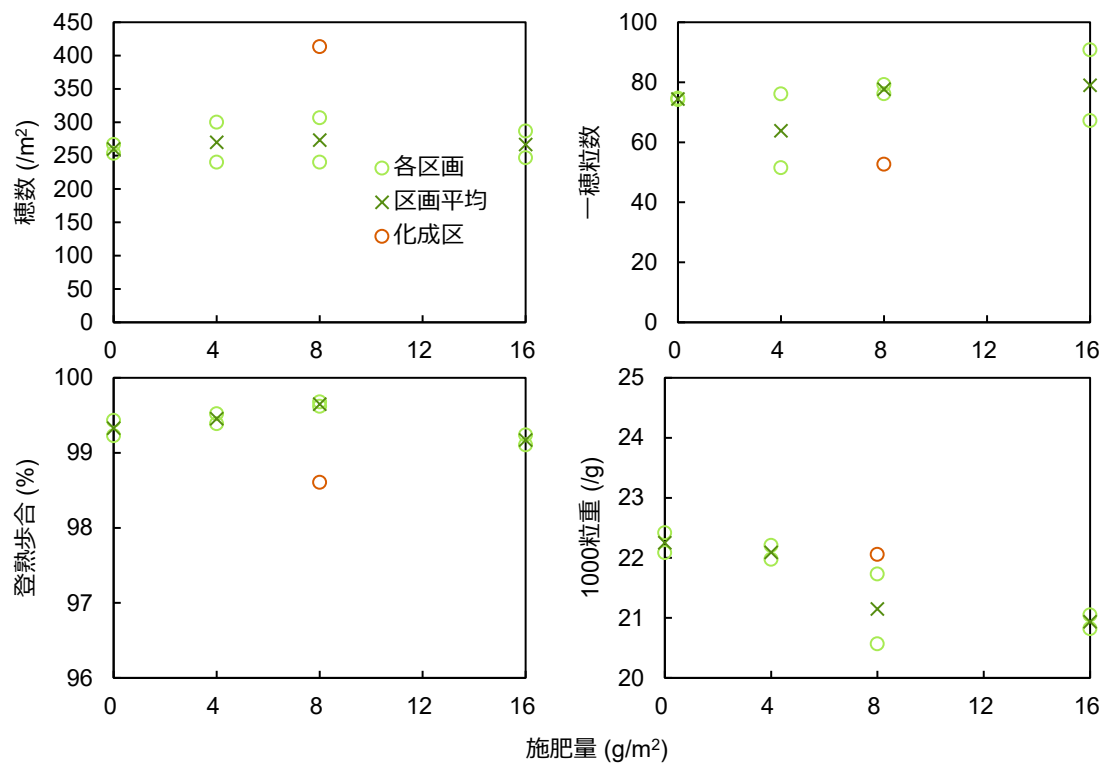


図 3.5.7 収量構成要素

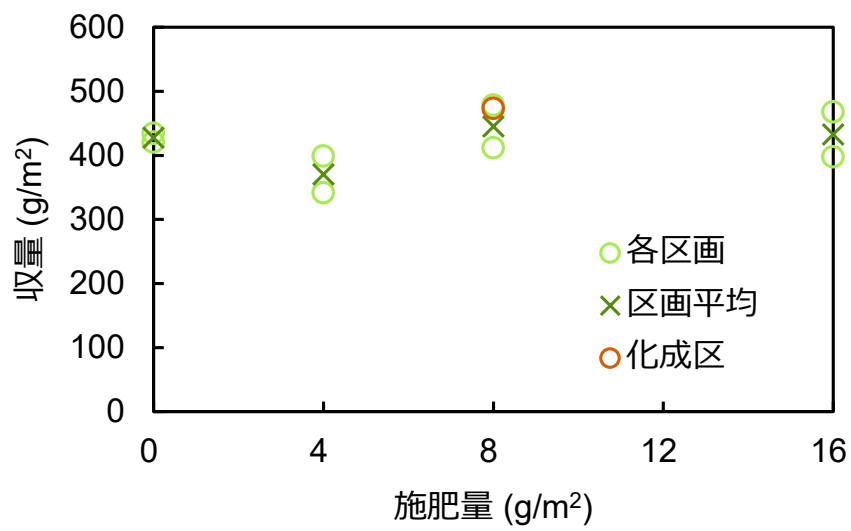


図 3.5.8 収量

### 3.6 土試料の NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N 測定結果

ここでは、4 深度 (0-2, 2-10, 10-20, 20-25 cm) に分けて採取した土試料から測定した全量 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N の測定結果をプロファイルとして示す。また、測定した土試料は plot1-plot8 (牛糞堆肥施用区かつイネ栽培区) のみのため、その結果を示す。

#### 3-6-1 NH<sub>4</sub>-N のプロファイル

各区画、施肥量毎の全量 NH<sub>4</sub>-N のプロファイルを図 3.6.1 に示す。施肥量毎の結果は同一施肥量の 2 区画を平均して求めた。平均化する際、他区画や前後の結果との整合性から、1 部の施肥量毎の全量 NH<sub>4</sub>-N は、平均値ではなく区画毎の全量 NH<sub>4</sub>-N を用いた。本実験で使用する施肥量毎の結果を図 3.6.2 に示す。

N0 区は、3/17-4/12 にかけて深さ 0-10 cm で減少した。そこから 6/3 にかけて深さ 0-10 cm で増加した。5/30-6/3 の増加は、代かきによって下層にあった未分解の有機物が上層に持ち上げられたこと、酸素と混合し有機物分解が促進された影響だと考えられる。6/3-20 にかけて、深さ 0-2 cm は急激に、深さ 2-10 cm は緩やかに、深さ 10 cm 以深は一定速度で減少した。深さ 0-2 cm の急激な減少は、酸化層による硝化や、藻類の持ち去りが原因だと考えられる。6/20-7/7 にかけて深さ 0-10 cm で減少した。このことから、深さ 0-10 cm での有機物分解速度は、窒素吸収速度より下回ると考えられる。逆に 7/7-7/24 にかけて深さ 0-10 cm で増加したことから、深さ 0-10 cm での有機物分解速度は、窒素吸収速度より上回ると考えられる。また、7/24-8/11 にかけて深さ 0-10 cm で減少したことから、深さ 0-10 cm での有機物分解速度は、窒素吸収速度より下回ると考えられる。8/11-9/13 にかけて、深さ 0-10 cm で増加した。これは、イネの窒素吸収速度 (図 3.5.6) がほぼ止まっていることから説明がつく。全期間を通して、全量 NH<sub>4</sub>-N 量の深さの傾向は、0-2 > 2-10 > 10-20 ≒ 20-25 cm であることが分かった。このことから、有機物分解は深さ 0-10 cm で活発に行われていると考えられる。

牛糞堆肥施肥区 (N4, N8, N16 区) は、基本的に N0 区と同じ傾向を示した。また、全量 NH<sub>4</sub>-N 量は牛糞堆肥施肥量が多いほど大きく、深度が浅いほど増加量が大きくなる傾向がみられた。

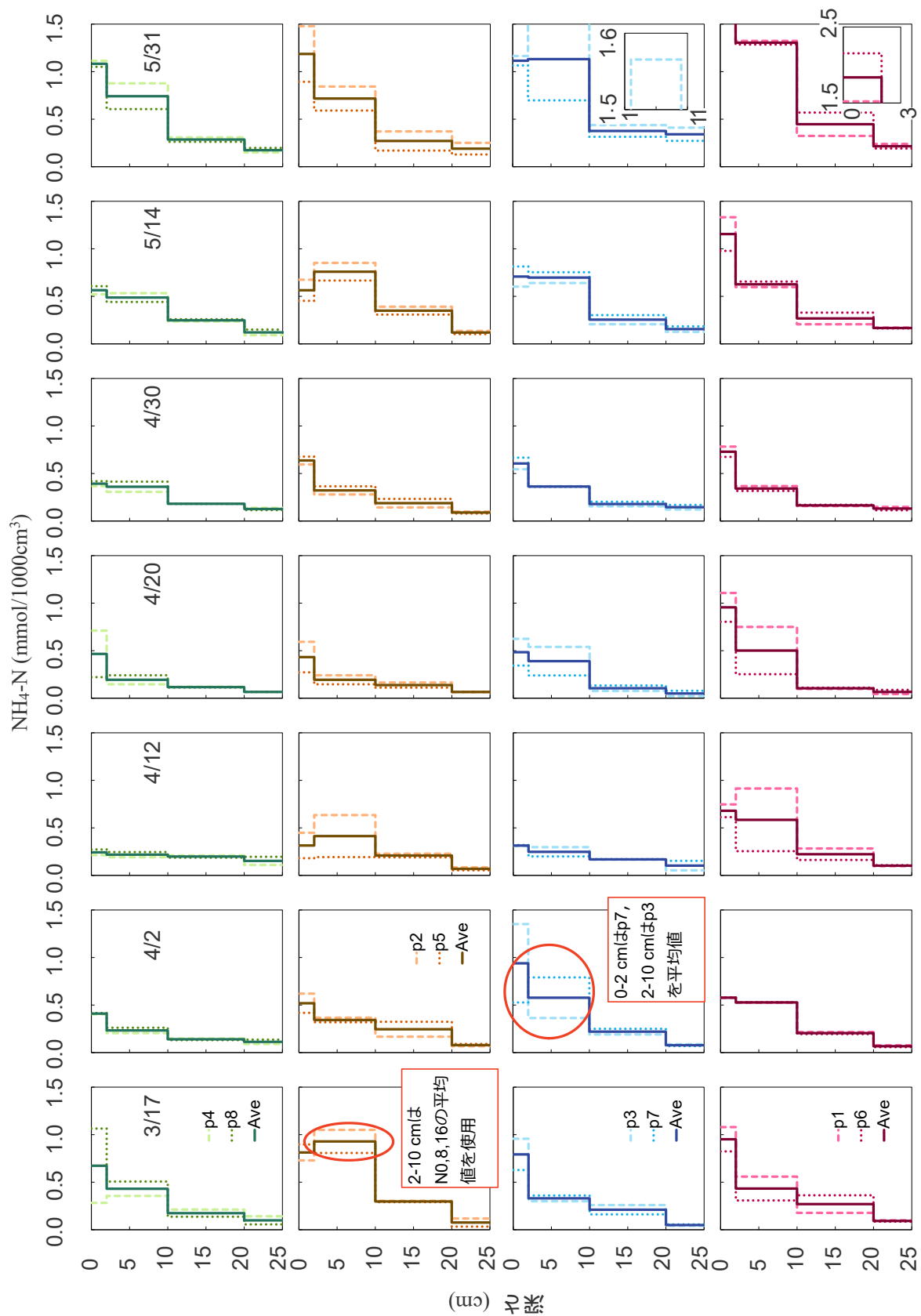


図 3.6.1-a 3月17日～5月31日の $\text{NH}_4\text{-N}$  (上図からN0区, N4区, N8区, N16区)

NH<sub>4</sub>-N (mmol/1000cm<sup>3</sup>)

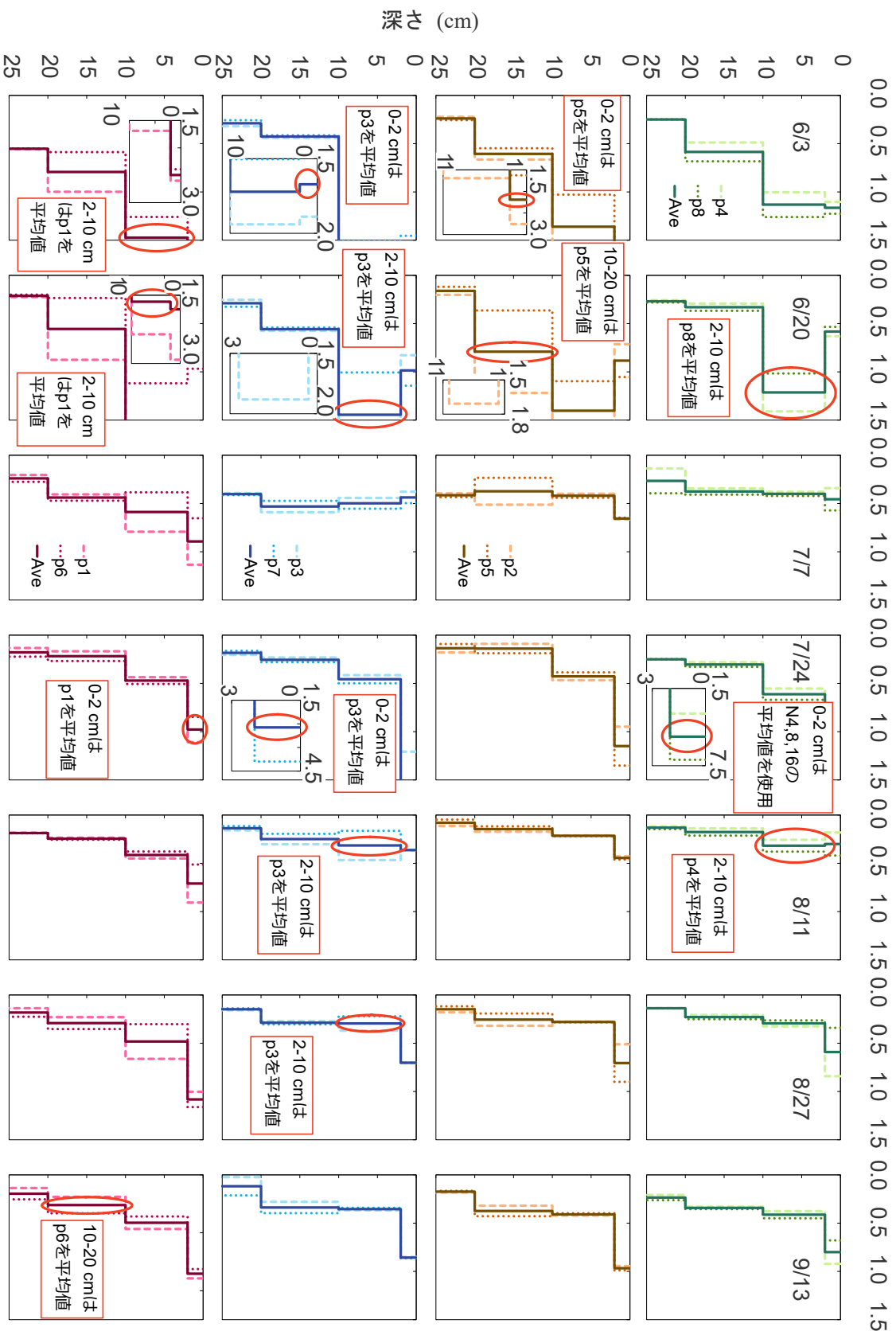


図 3.6.1-b 6月3日～9月13日のNH<sub>4</sub>-N (上図からN0区, N4区, N8区, N16区)

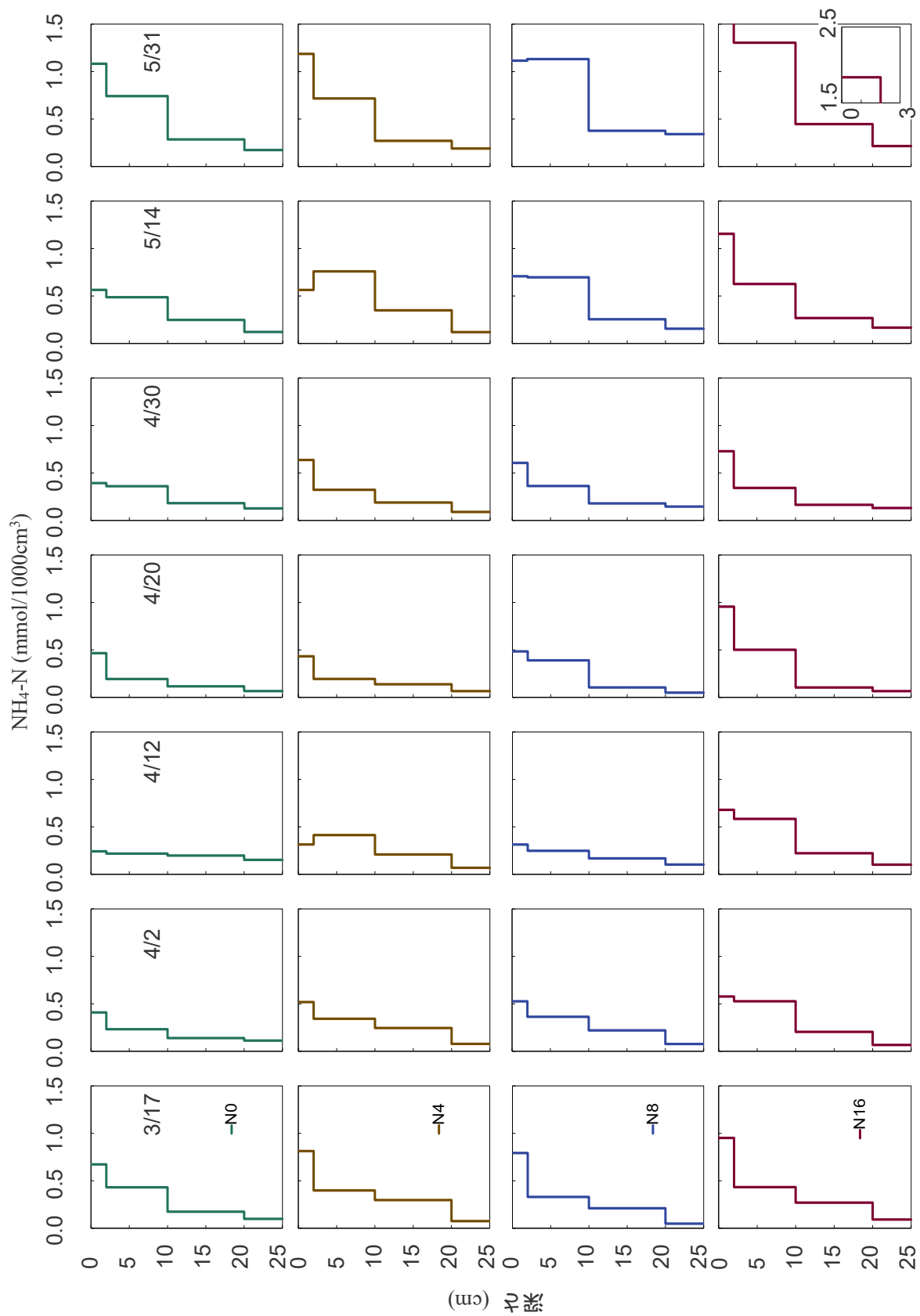


図 3.6.2-a 3月17日～5月31日の $\text{NH}_4\text{-N}$  (上図からN0区, N4区, N8区, N16区)

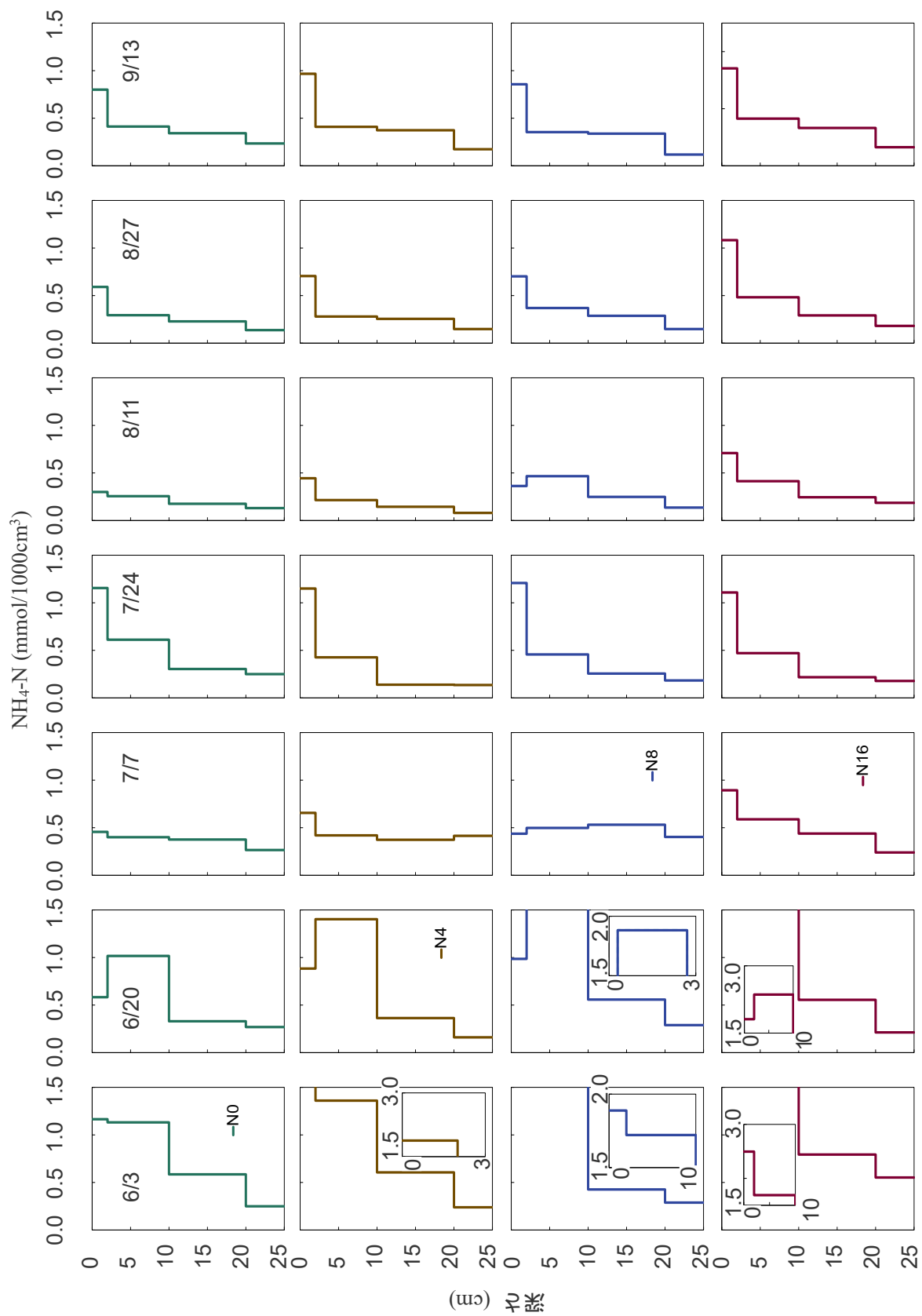


図 3.6.2-b 6月3日—9月13日の $\text{NH}_4\text{-N}$  (上図からN0区, N4区, N8区, N16区)



### 3-6-2 NO<sub>3</sub>-N のプロファイル

各区画、施肥量毎の NO<sub>3</sub>-N のプロファイルを図 3.6.3 に示す。施肥量毎の結果は同一施肥量の 2 区画を平均し、1 区画のみ NO<sub>3</sub>-N がある場合（もう一方の区画の NO<sub>3</sub>-N が 0）はその区画の NO<sub>3</sub>-N とした。本実験で使用する施肥量毎の結果を図 3.6.4 に示す。

NO<sub>3</sub>-N は、3/17-4/2 にかけて N0, N4 区でなくなった。しかし、N16 区では全深度でみられた。4/12 は全区画深さ 0-2 cm でみられ、N4, N16 区では 1.7, 3.4 mmol/1000cm<sup>3</sup> と全期間、全区画と比べかなり大きかった。これは、図 3.4.4 より 4/4-13 の無降水期間で乾燥していたことから、好気条件になり硝化が促進されたと考えられる。4/20 では N8, N16 区の深さ 10 cm 以深でみられ、4/30 では N4, N16 区の深さ 25 cm でみられた。4/13 以降は断続的な降水があったことから、土中水流れによって表層の NO<sub>3</sub>-N が下方に流れたと考えられる。5/31 以降は N8 と N16 区、6/3 以降は N0 と N4 区で深さ 0-10 cm でみられ、深さ 0-2 cm の方が深さ 2-10 cm よりも大きかった。また、深さ 10 cm 以深では見られなかったことから、6/3 の移植以降（湛水）は、土中水流れによって NO<sub>3</sub>-N が深さ 10 cm 以深に流れ、10 cm 以深で脱窒が起きたと考えられる。

NH<sub>4</sub>-N と違い、牛糞堆肥施肥量が多いほど大きいといった傾向は見られなかった。

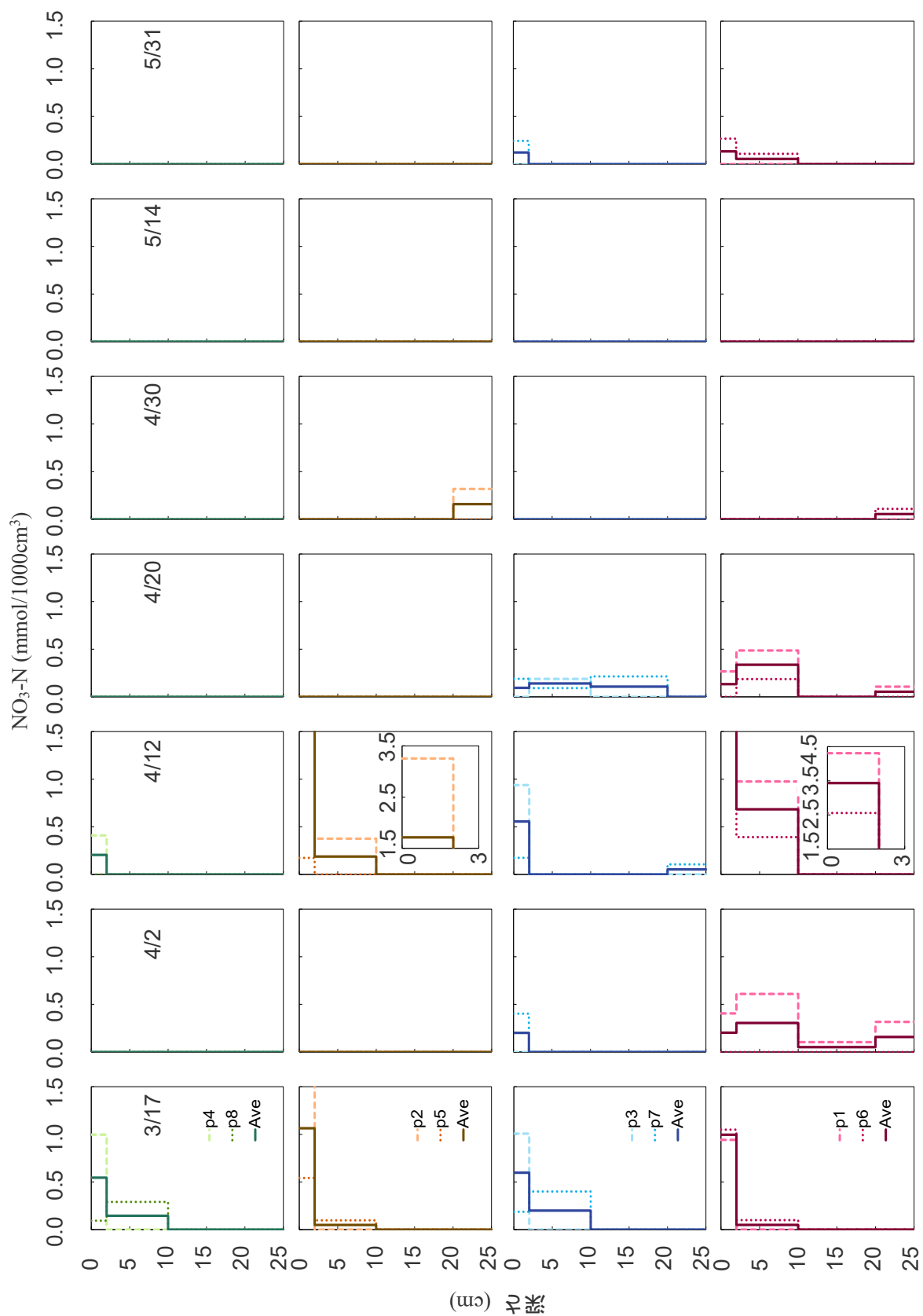


図 3.6.3-a 3月17日～5月31日の $\text{NO}_3\text{-N}$  (上図からN0区, N4区, N8区, N16区)



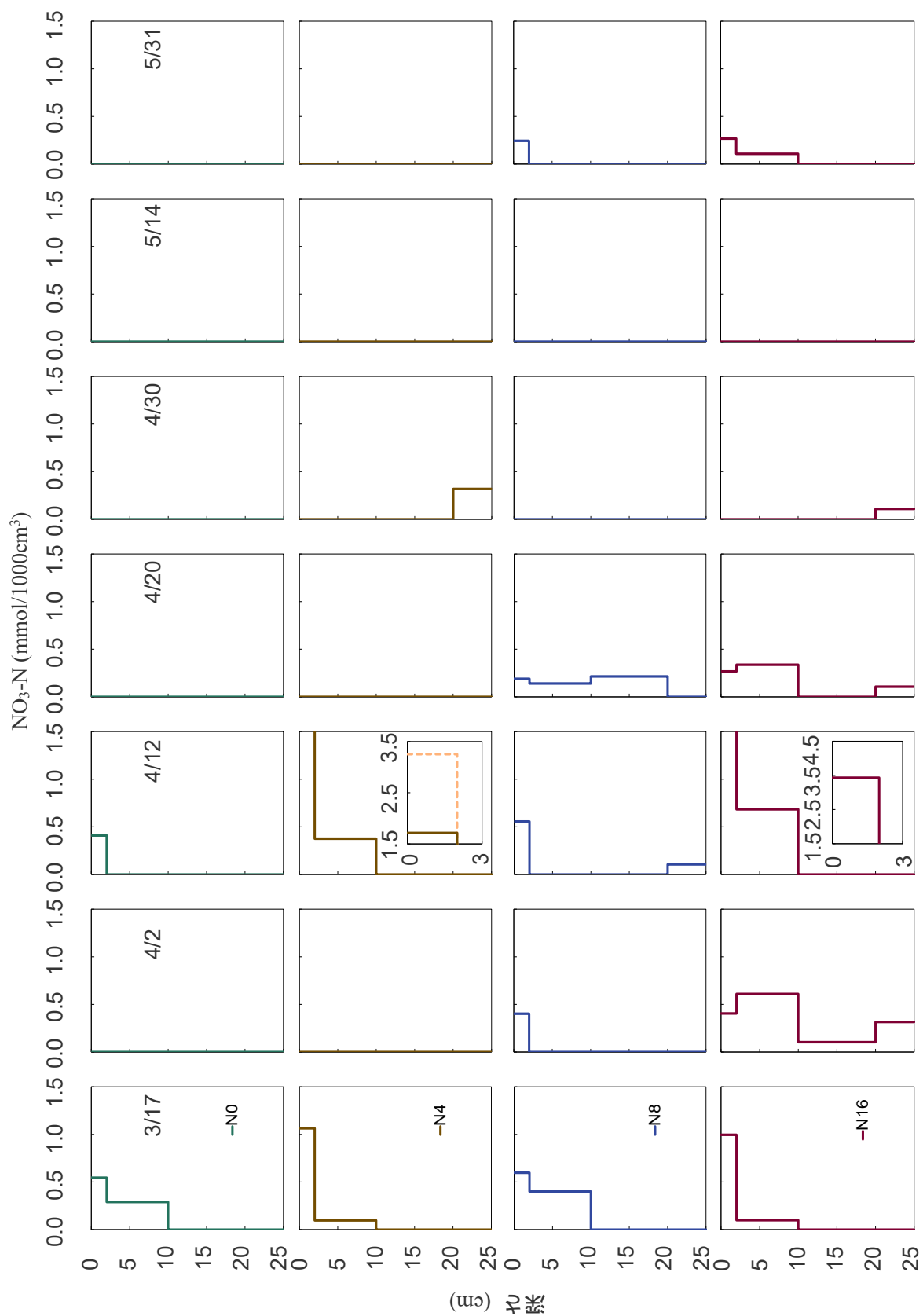


図 3.6.4-a 3月17日～5月31日の $\text{NO}_3\text{-N}$  (上図からN0区, N4区, N8区, N16区)

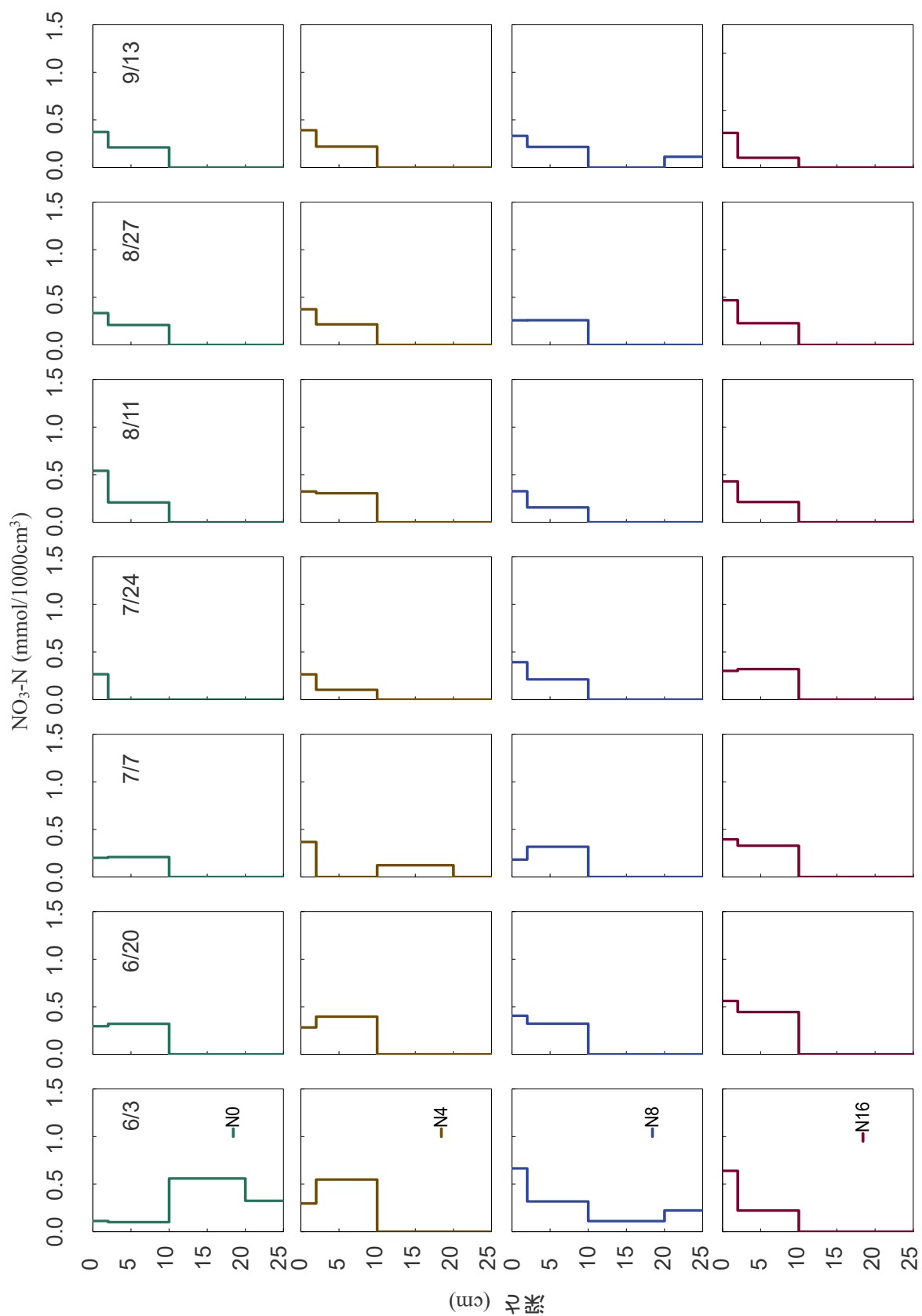


図 3.6.4-b 6 月 3 日—9 月 13 日の  $\text{NO}_3\text{-N}$  (上図から N0 区, N4 区, N8 区, N16 区)

### 3-7 土中の水分移動

ここでは、測定結果をもとに土中の水分移動を計算した。その結果を示す。

#### 3-7-1 可能蒸発散量 $ET_p$

日平均日射量  $[W/m^2]$ ，日平均気温  $[^{\circ}C]$ ，日平均相対湿度  $[\%]$ ，日平均風速  $[m/s]$ ，式 2.4.16-2.4.21 のペンマン式を用い、日平均可能蒸発散量  $ET_p$   $[cm/d]$ を求めた。結果を図 3.7.1 に示す。

$ET_p$  は、全体的な増減はあるものの、3 月から 6 月末にかけて増加した。また、6/29 が最も大きく、0.83  $cm/d$  だった。7 月から 9 月にかけて減少傾向がみられた。

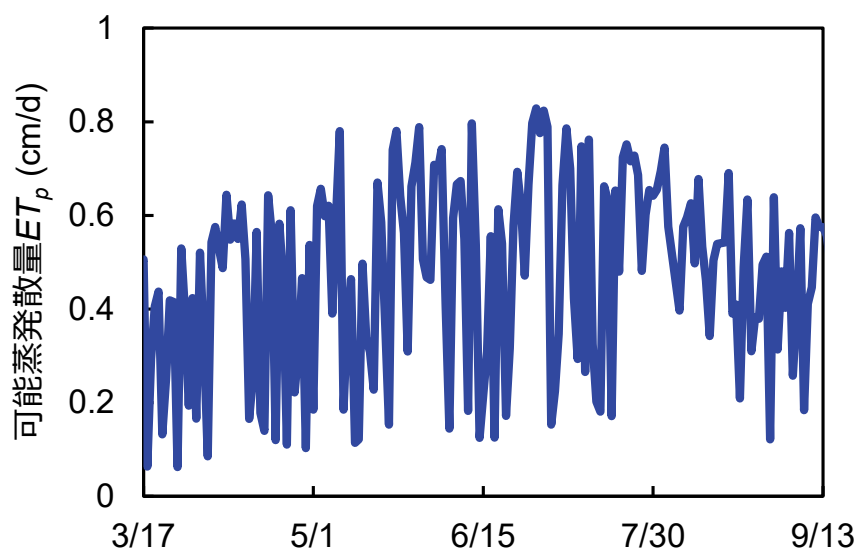


図 3.7.1 Penman 式による日平均可能蒸発散量

#### 3-7-2 可能蒸発量 $E_p$ と可能蒸散量 $T_p$

式 2.4.22 を用い、日平均可能蒸発量  $E_p$   $[cm/d]$ と日平均可能蒸散量  $T_p$   $[cm/d]$ を求めた。ここで、 $a_i$   $[-]$ は Phogat ら (2010) より、イネで 0.3 とした。永源 (2022) は、2020 年に本研究と同じ圃場、同じ施肥条件 (肥料：米ぬか) でナツヒカリ (極早生品種) を栽培し、葉面積指数 LAI を測定した。そこで、本研究のイネ (コシヒカリ) の各採取日の全区画の LAI (移植：6/3，分げつ始期：6/20，分げつ活性期：7/7，幼穂形成期：7/24，出穂期：8/11，登熟期：9/13) が、2020 年度の N8 区の LAI (移植：6/3，分げつ始期：6/17，分げつ活性期：6/29，幼穂形成期：7/10，出穂期：7/26，登熟期：8/26) と同じ値であるとし、採取日間の LAI は線形で増減するとした。本研究で使用する LAI を図 3.7.2， $E_p$  と  $T_p$  の結果を図 3.7.3 に示す。

$E_p$  は、移植後徐々に減少し、最少は 7/19 で 0.05  $cm/d$  だった。以降は概ね一定で、平均値は 0.15  $cm/d$  だった。

$T_p$  は、移植後徐々に増加し、最大は 7/23 で 0.54 cm/d だった。以降は緩やかに減少した。

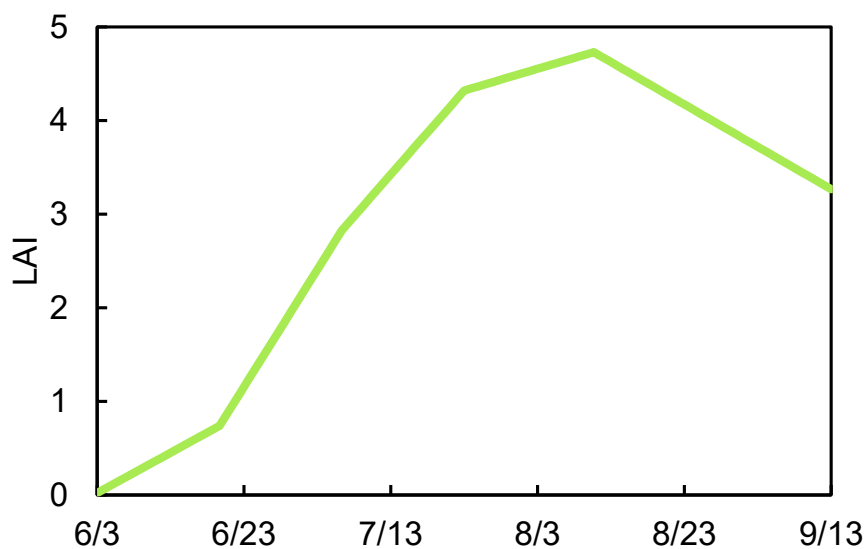


図 3.7.2 イネの葉面積指数 LAI (永源 (2022) のデータより作成)

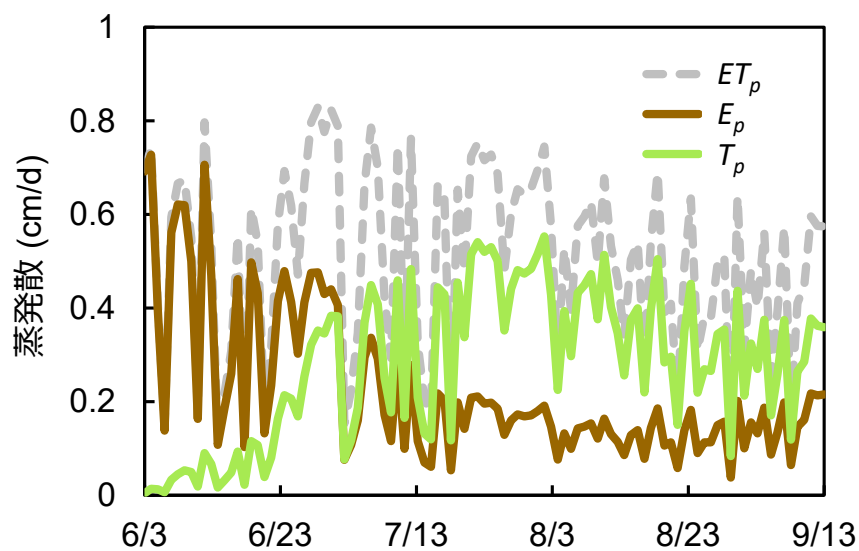


図 3.7.3 栽培期間中の日平均可能蒸発量  $E_p$  と日平均可能蒸散量  $T_p$

### 3-7-3 下方浸透水量

深さ 15, 25 cm の土中水圧力  $h$  [cm], 式 3.1.2 の VG モデルを用い、各深度の不飽和透水係数  $K(h)$  [cm/d] (下向き正) を求めた。ここで、テンシオメータの設置前 (3/17-6/4) の  $h$  は、深さ 15, 25 cm の体積含水率  $\theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>], 3.1.1 式の VG モデルを用い求めた。深さ 15, 25 cm の  $h$  を図 3.7.4, 深さ 15, 25 cm の  $K(h)$  を図 3.7.5 に示す。

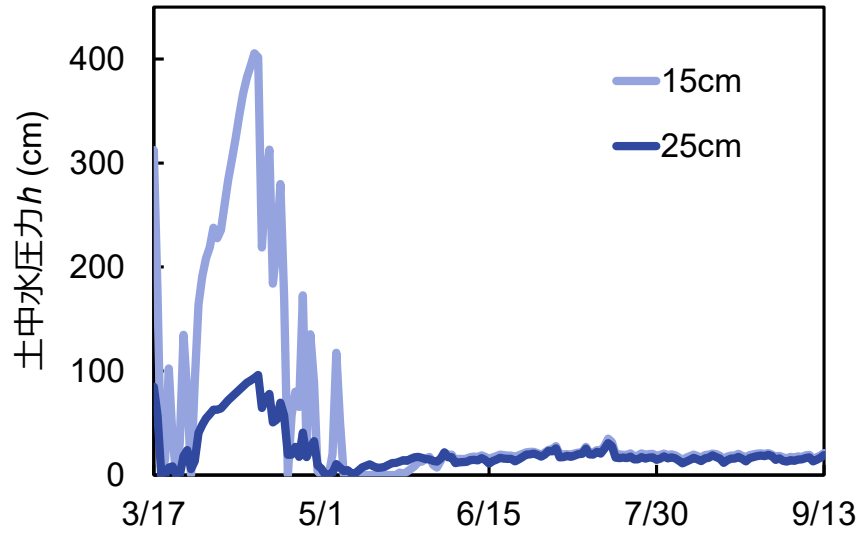


図 3.7.4 全期間の深さ 15, 25 cm の土中水圧力  $h$

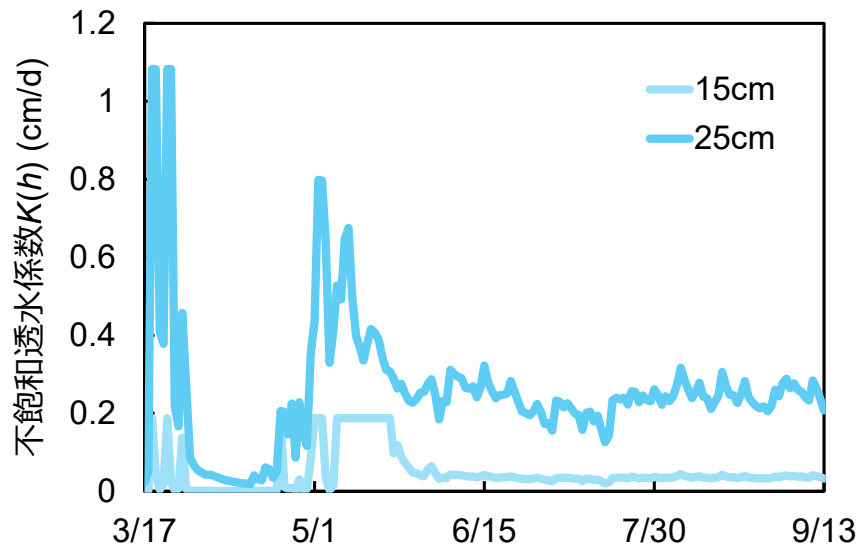


図 3.7.5 全期間の深さ 15, 25 cm の不飽和透水係数  $K(h)$  (下向き正)

ここで、2 点間の有効透水係数  $K_{\text{eff}}(h)$  [cm/d] を次式で求めた。

$$K_{\text{eff}}(h) = \frac{z_1 + z_2}{\frac{z_1}{K(h)_{z_1}} + \frac{z_2}{K(h)_{z_2}}} \quad \text{式 3.7.1}$$

$z_1, z_2$  [cm] はそれぞれ深さ (15 cm, 25 cm) である。 $K_{\text{eff}}(h)$  を、深さ 15-25 cm で一定の不飽和透水係数とみなし、式 2.1.1 のバッキンガム-ダルシー則を用いて深さ 25 cm の下方浸透水量  $J_w$  [cm/d] (下向き正) を求めた。結果を図 3.7.6 に示す。



$J_w$  は、3/23 の 0.39 cm/d から大きく減少し、3/29 は 0.06 cm/d と 0.1 cm/d を下回った。以降も減少し、最少は 4/14 で 0.18 cm/d だった。以降は緩やかに増加し、4/22 は 0.19 cm/d と 0.1 cm/d を上回った。以降は大きく増減し、5/14 は 0 cm/d となった。 $h$  をテンシオメータで測定した 6/5 以降は概ね一定で、平均値は 0.09 cm/d だった。

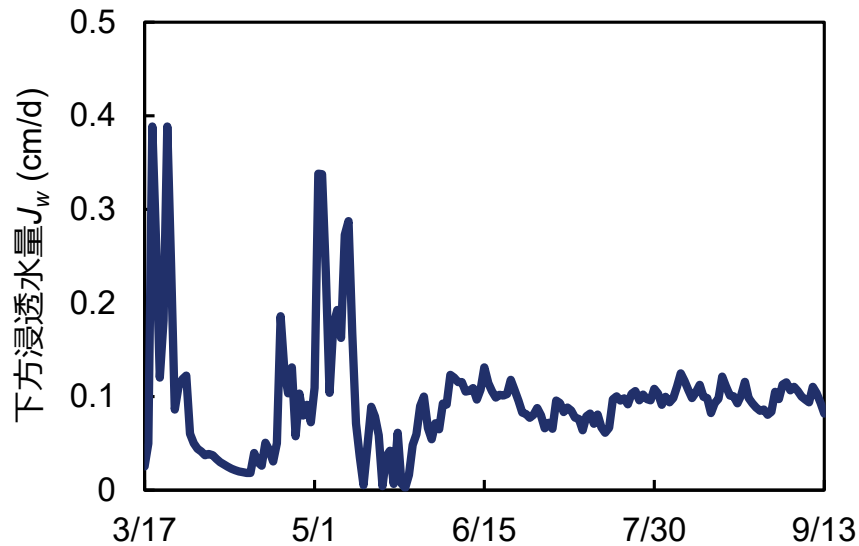


図 3.7.6 深さ 25 cm の下方浸透水量  $J_w$  (下向き正)

### 3-7-4 かんがい水量

地表面での水収支式は次のように表せられる。

$$P + I - R - ET = D_0 \quad \text{式 3.7.2}$$

ここで、 $P$  [cm] は降水量、 $I$  [cm] はかんがい水量、 $R$  [cm] は表面流出量、 $ET$  [cm] は蒸発散量、 $D_0$  [cm] は土中への下方浸透水量である。

実験圃場は人口畔で囲んでいるため、 $R = 0$  としたとき上式は次のようになる。

$$P + I - ET = D_0 \quad \text{式 3.7.3}$$

ここで、水深が増加した時間、すなわち 1 日数 10 分のかんがい時と日射量が少ない降水時は、 $ET$  と  $D_0$  を無視できると仮定し、かんがい水量  $I$  を次式で求めた。

$$\text{水深の増加量} = P + I$$

式 3.7.4

上式を用い、日積算かんがい水量を求めた。日積算かんがい水量を図 3.7.7、積算降水量と積算灌漑水量を図 3.7.8 に示す。

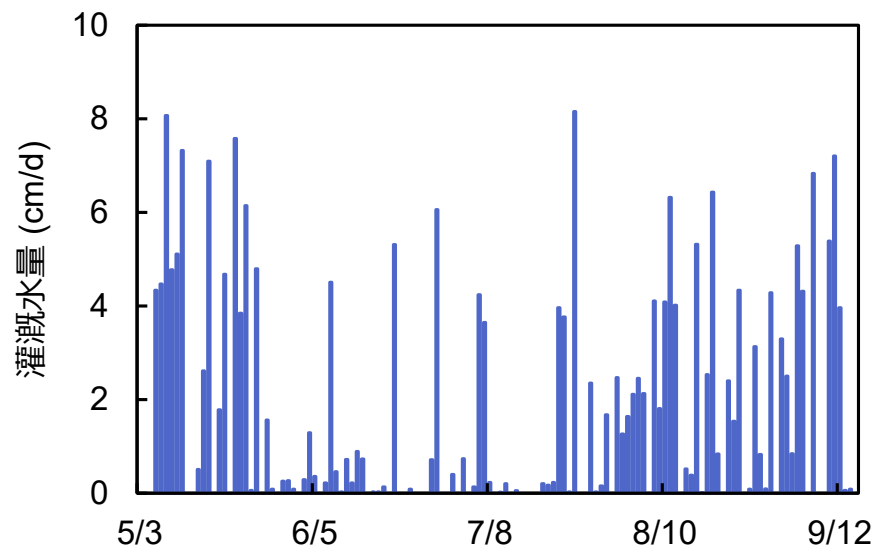


図 3.7.7 日積算かんがい水量

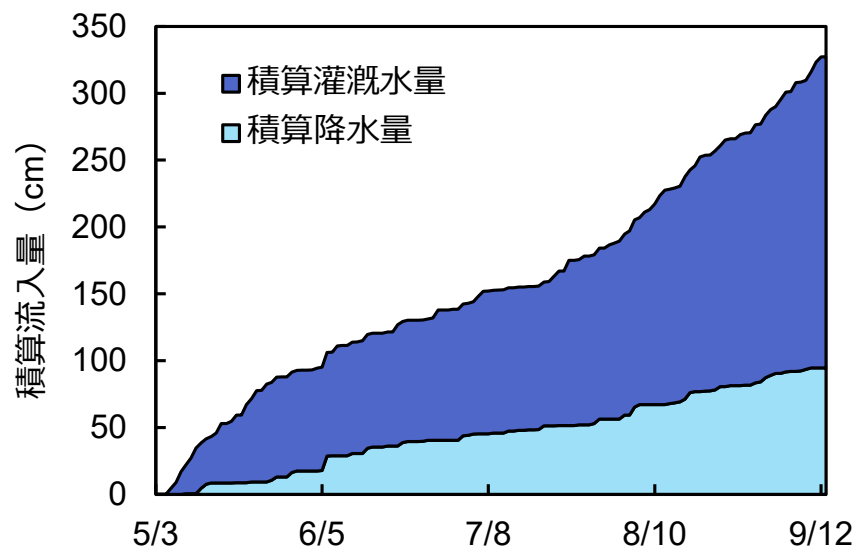


図 3.7.8 積算降水量と積算かんがい水量

### 3-7-5 水収支

地表面から深さ 25 cm までの水収支式は次のように表せられる。

$$P + I - R - ET = D + \Delta W_s + \Delta W_l \quad \text{式 3.7.5}$$

ここで、 $D$  [cm]は深さ 25 cm 以深への下方浸透水量、 $\Delta W_s$ は貯留変化量、 $\Delta W_l$ は水深変化量である。実験圃場は人口畔で囲んでいるため、 $R=0$ としたとき上式は次のようになる。

$$P + I - ET = D + \Delta W_s + \Delta W_l \quad \text{式 3.7.6}$$

湛水期間かつ灌漑水量を求められた期間 (5/3-9/13) における、非栽培期間 (5/3-6/2) の実蒸発量  $E_a$  [cm/d]、栽培期間の実蒸発散量  $ET_a$  [cm/d]は、それぞれ Penman 式で求めた可能蒸発散量  $ET_p$  とする。また、深さ 0-10, 10-20 cm, 20-25 cm の体積含水率  $\theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]を、それぞれ深さ 5, 15, 25 cm の  $\theta$  が一様に分布していると仮定する。 $ET$  と  $D$  の和を積算流出量、 $P$  と  $I$  の和を積算流入量とし、積算流出量と  $\Delta W_s$ ,  $\Delta W_l$ を積み上げ図として、積算流入量を折れ線として図 3.7.9 に示す。

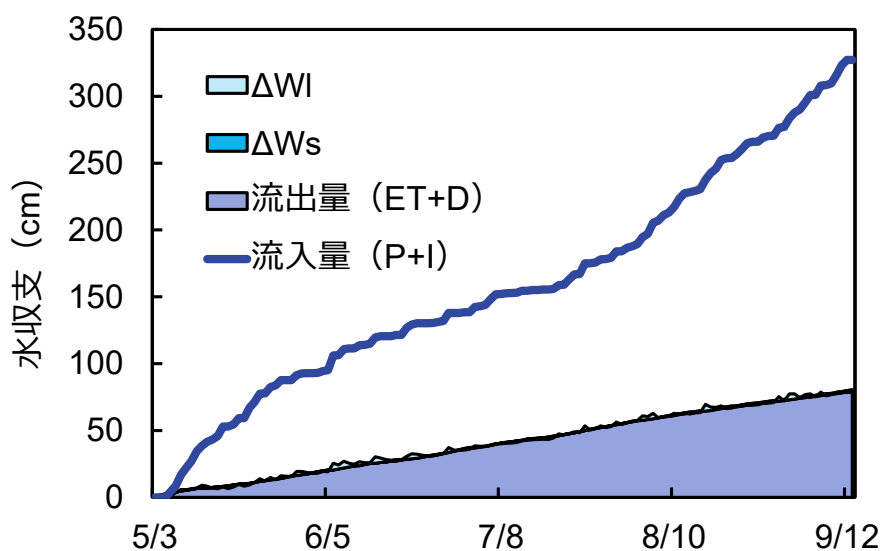


図 3.7.9 湛水期間 (5/3-9/13) の水収支

図から、積算流出量と  $\Delta W_s$ ,  $\Delta W_l$  の和と、積算流入量に大きな違いがあることがわかる。そこで、積算流出量と  $\Delta W_s$ ,  $\Delta W_l$  の和と、積算流入量の差を不明水 [cm]とし、図 3.7.10 に示す。

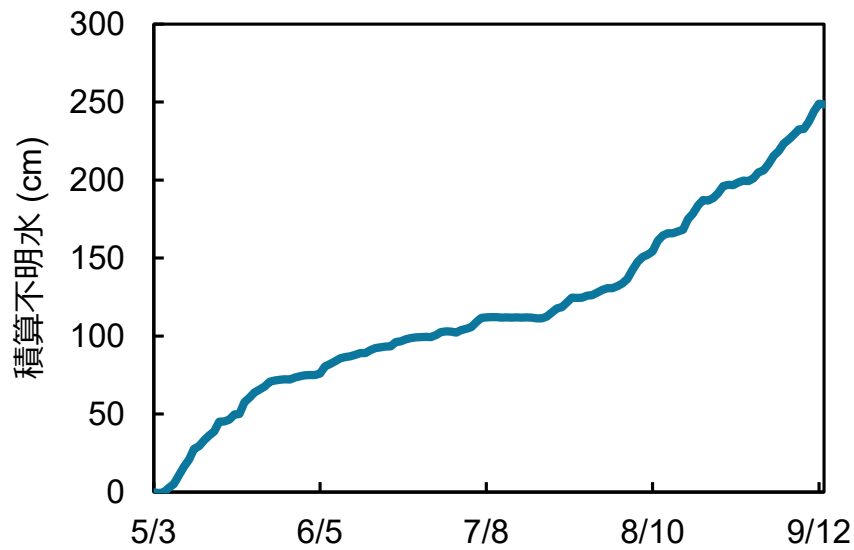


図 3.7.10 水収支から求めた湛水期間（5/3－9/13）の積算不明水

栽培期間中の晴天が続く日でも、人口畔の外側で水たまりが幾度も確認された。5/17, 19, 27 には人口畔の再設置を深さ約 25 cm まで行った。しかし、設置深さが足りない、時間経過に伴い人口畔の深さが浅くなった等の理由から、深さ 25 cm 付近の水が横向きに流れ、人口畔の外側の土へ流れ込んだ可能性があると考えられる。

### 3-8 土中の窒素移動

ここでは、測定結果をもとに土中の窒素移動および収支を計算した。その結果を示す。

#### 3-8-1 窒素の下方浸透量

永源（2022）は、2019 年に本研究と同じ圃場 3 区画の溶存  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  を測定した。その結果を図 3.8.1 に示す。

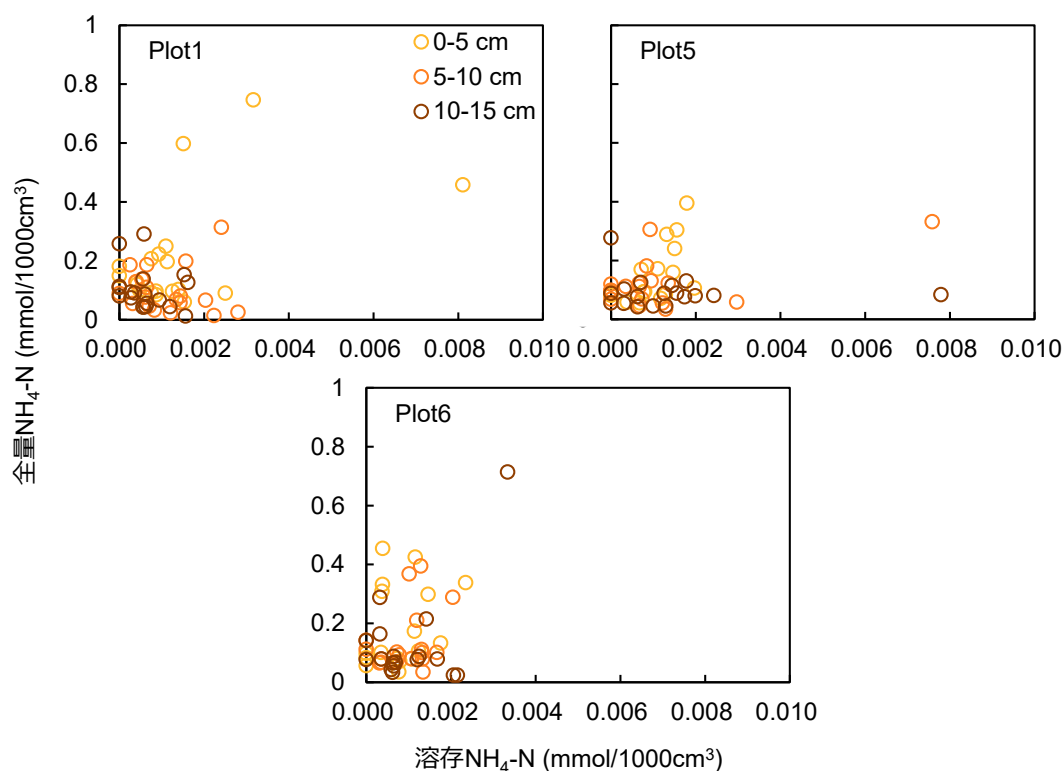


図 3.8.1 溶存 NH<sub>4</sub>-N と全量 NH<sub>4</sub>-N の関係（永源（2022）のデータより作成）

永源（2022）は、3 区画の全量 NH<sub>4</sub>-N に対する溶存 NH<sub>4</sub>-N の割合（溶存 NH<sub>4</sub>-N/全量 NH<sub>4</sub>-N）を 0.06742 と求め、この値が全期間、深さ 0-25 cm で統一できるとした。そこで、本研究ではこの値を使用し、同様の仮定をする。

ここで、深さ  $z$  cm の窒素の下方浸透量  $J_{w-N_z}$  [g/(m<sup>2</sup>・d)] を次式で求めた。

$$J_{w-N_z} = (\text{溶存NH}_4\text{-N}_z + \text{NO}_3\text{-N}_z) \times \theta_z \times J_{w_z} \quad \text{式 3.8.1}$$

溶存 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N [g/10000cm<sup>3</sup>] は 10000 cm<sup>3</sup> あたりの窒素量,  $J_w$  [cm/d] は下方浸透水量（下向き正）、添え字  $z$  は深さ  $z$  [cm] における各項目の値である。

溶存 NH<sub>4</sub>-N は次の式で求めた。

$$\text{溶存NH}_4\text{-N} = \text{全量NH}_4\text{-N} \times 0.06742 \quad \text{式 3.8.2}$$

全量 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N の測定日間は線形で増減すると仮定し、式 3.8.1, 3.8.2 を用いて、深さ 25 cm の  $J_{w-N}$  を求めた。日平均と積算の結果を図 3.8.2 に示す。

日平均  $J_{w-N}$  は、3/23 にかけて N16 区で  $0.007 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  まで増加した。その後減少し、4/22 以降は N4, N16 区で増加した。5/2 にピークに達し、N4, N16 区はそれぞれ  $0.013$ ,  $0.005 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  だった。その後減少し、6/1 以降は N0, N18 区で増加した。6/6 にピークに達し、N0, N18 区はそれぞれ  $0.005$ ,  $0.006 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  だった。その後減少し、以降は N8 区を除き概ね  $0 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  だった。N8 区は 8 月末から増加し、9/13 は  $0.001 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  だった。

積算  $J_{w-N}$  は、5/10 に N4, N16 区で  $0.088 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  に達し、以降は緩やかに増加した。N0, N8 区は 6/17 にそれぞれ  $0.056$ ,  $0.047 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  に達し、以降は緩やかに増加した。9/13 では、N4, N16 区で平均  $0.112 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$ , N0, N8 区で平均  $0.076 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{d)}$  だった。

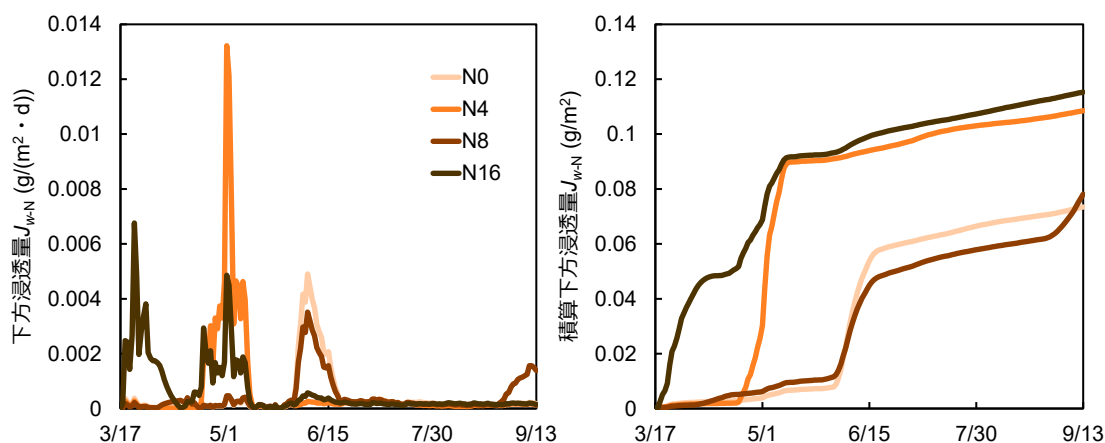


図 3.8.2 深さ 25 cm の窒素の下方浸透量  $J_{w-N}$

### 3-8-2 窒素収支

牛糞堆肥を施用した水田土中の窒素収支は次のように表せられる。

(牛糞堆肥+土壌有機物) の無機化量=イネの吸収量

$$\begin{aligned}
 &+ (\text{溶存 } \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}) \text{ の下方浸透量} \\
 &+ \text{揮発量} + \text{脱窒量} \\
 &+ (\text{全量 } \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}) \text{ の貯留変化量}
 \end{aligned}
 \tag{式 3.8.3}$$

本研究の圃場実験では、揮発量、脱窒量は測定できていない。そのため、これらを 0 と仮定したときの窒素収支を求めた。また、収支は深さ 0-25 cm で計算する。牛糞堆肥施用によって増加した窒素量は、牛糞堆肥施用区 (N4, N8, N16 区) と無施肥区 (N0 区) の差をとることで、牛糞堆肥由来の窒素量とし、これを上式の各項目求めた。N0 区の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$ , 牛糞堆肥由来の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  を積み上げた結果を図 3.8.3 に示す。

N0 区の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の和は、3/17 の  $1.5 \text{ g/m}^2$  から 4/2 の  $0.7 \text{ g/m}^2$  と、 $0.8 \text{ g/m}^2$

減少した。4/30 は  $0.9 \text{ g/m}^2$  と、4/2 から 4/30 にかけて緩やかに増減し、5/31 は  $1.7 \text{ g/m}^2$  と 4/30 から  $0.8 \text{ g/m}^2$  増加した。また、3/17-5/31 は大半が全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  だった。6/3 は全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  は  $2.6 \text{ g/m}^2$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $1.2 \text{ g/m}^2$  で、5/31 は全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  は  $1.7 \text{ g/m}^2$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $0.0 \text{ g/m}^2$  だったことから、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の増加が要因となっていた。7/7 は  $1.6 \text{ g/m}^2$  と、6/3 から  $2.2 \text{ g/m}^2$  減少した。以降は緩やかに増減し、9/13 で  $1.7 \text{ g/m}^2$  だった。また、6/20-9/13 にかけて  $\text{NO}_3\text{-N}$  は概ね  $0.3 \text{ g/m}^2$  で一定だった。

N4 区の牛糞堆肥由来の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の和は、4/2 の  $0.3 \text{ g/m}^2$  から 4/12 の  $1.0 \text{ g/m}^2$  と、 $0.7 \text{ g/m}^2$  増加した。このとき、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $0.0 \text{ g/m}^2$  から  $0.8 \text{ g/m}^2$  と大きく増加した。4/20 は  $0.0 \text{ g/m}^2$  と大きく減少したが、5/14 は  $0.4 \text{ g/m}^2$  と増加した。5/31 は  $0.0 \text{ g/m}^2$  と減少したが、6/3 は  $1.0 \text{ g/m}^2$  と増加し、このときの  $\text{NO}_3\text{-N}$  は 5/14 の  $0.0 \text{ g/m}^2$  から 6/3 の  $0.5 \text{ g/m}^2$  と大きく増加した。また、6/3 の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  は  $0.4 \text{ g/m}^2$  のため、半分以上が  $\text{NO}_3\text{-N}$  で占めていた。7/24 は  $0.1 \text{ g/m}^2$  と、6/3 から  $0.8 \text{ g/m}^2$  減少した。以降は概ね  $0.1 \text{ g/m}^2$  で一定だった。また、6/20-9/13 にかけて  $\text{NO}_3\text{-N}$  は概ね  $0.1 \text{ g/m}^2$  で一定だった。

N8 区の牛糞堆肥由来の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の和は、3/17 は  $0.2 \text{ g/m}^2$ 、4/2 は  $0.4 \text{ g/m}^2$ 、4/12 は  $0.2 \text{ g/m}^2$  と緩やかに増減した。このとき、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $0.1 \text{ g/m}^2$  で一定だった。4/20 は  $0.7 \text{ g/m}^2$  と大きく増加したが、4/30 は  $0.1 \text{ g/m}^2$  と  $0.6 \text{ g/m}^2$  減少した。6/20 は  $1.4 \text{ g/m}^2$  で、4/30 から一定割合で増加した。このとき、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は 6/3 で  $0.4 \text{ g/m}^2$ 、6/20 で  $0.0 \text{ g/m}^2$  だった。また、6/3 の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  は  $0.9 \text{ g/m}^2$  のため、約 1/3 は  $\text{NO}_3\text{-N}$  で占めていた。7/24 は  $0.3 \text{ g/m}^2$  と、6/20 から  $1.1 \text{ g/m}^2$  減少した。以降は緩やかに増減し、9/13 で  $0.1 \text{ g/m}^2$  だった。また、7/24 の  $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $0.2 \text{ g/m}^2$  とわずかに 6/20 から増加したが、以降はほとんどみられなかった。

N16 区の牛糞堆肥由来の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の和は、3/17 の  $0.3 \text{ g/m}^2$  から 4/12 の  $2.2 \text{ g/m}^2$  と、 $1.9 \text{ g/m}^2$  増加した。このとき、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $0.1 \text{ g/m}^2$  から  $1.6 \text{ g/m}^2$  と大きく増加した。4/30 は  $0.2 \text{ g/m}^2$  と、4/12 から  $2.0 \text{ g/m}^2$  減少した。このとき、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $0.1 \text{ g/m}^2$  と、4/12 から  $1.5 \text{ g/m}^2$  減少した。6/20 は  $2.0 \text{ g/m}^2$  と、4/30 から一定割合で増加した。このとき、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は 6/3 で  $0.3 \text{ g/m}^2$ 、6/20 で  $0.2 \text{ g/m}^2$  だった。また、6/3 の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  は  $1.5 \text{ g/m}^2$  と、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の占める量は少なかった。7/7 は  $0.6 \text{ g/m}^2$  と、6/20 から  $1.4 \text{ g/m}^2$  減少した。以降は緩やかに増減し、9/13 で  $0.2 \text{ g/m}^2$  だった。また、7/24 の  $\text{NO}_3\text{-N}$  は  $0.4 \text{ g/m}^2$  とわずかに 6/20 から増加したが、以降はほとんどみられなかった。

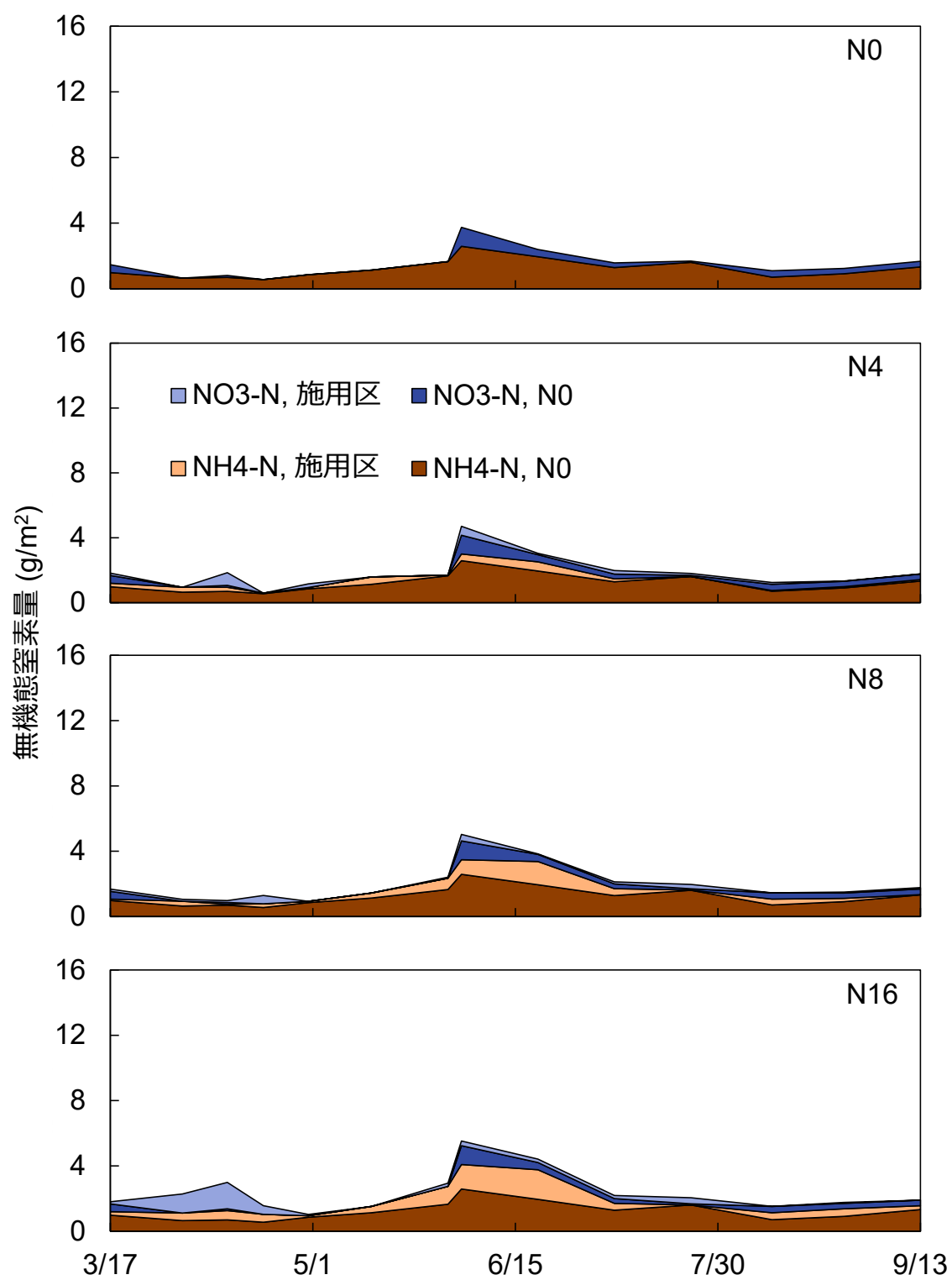


図 3.8.3 各施肥区の土中の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$



式 3.8.3 を各項目積み上げた結果を図 3.8.4 に示す。

N0 区の収支総和は、6/3 は  $3.7 \text{ g/m}^2$ 、6/20 は  $2.7 \text{ g/m}^2$  と  $1.0 \text{ g/m}^2$  減少したが、そこから急激に増加し、8/11 で  $7.3 \text{ g/m}^2$  だった。9/13 は  $8.0 \text{ g/m}^2$  と、8/11 以降は緩やかに増加した。

N4 区の牛糞堆肥由来の窒素量の収支総和は、6/3 は  $1.0 \text{ g/m}^2$ 、6/20 は  $0.7 \text{ g/m}^2$  と  $0.3 \text{ g/m}^2$  減少したが、7/7 にかけて変化はなかった。7/24 は  $0.3 \text{ g/m}^2$  と、7/7 から  $0.4 \text{ g/m}^2$  減少したが、以降は増加し 9/13 で  $1.0 \text{ g/m}^2$  だった。

N8 区の牛糞堆肥由来の窒素量の収支総和は、6/3 は  $1.3 \text{ g/m}^2$ 、6/20 は  $1.5 \text{ g/m}^2$  と  $0.2 \text{ g/m}^2$  増加したが、以降は減少し 7/24 で  $0.3 \text{ g/m}^2$  だった。8/11 は  $3.4 \text{ g/m}^2$  と、7/7 から  $3.1 \text{ g/m}^2$  増加し、9/13 は  $3.2 \text{ g/m}^2$  と  $0.2 \text{ g/m}^2$  減少した。

N16 区の牛糞堆肥由来の窒素量の収支総和は、6/3 は  $1.8 \text{ g/m}^2$ 、6/20 は  $2.1 \text{ g/m}^2$  と  $0.3 \text{ g/m}^2$  増加したが、以降は減少し 7/24 で  $0.9 \text{ g/m}^2$  だった。8/11 は  $3.5 \text{ g/m}^2$  と、7/7 から  $2.6 \text{ g/m}^2$  増加し、9/13 は  $3.2 \text{ g/m}^2$  と  $0.3 \text{ g/m}^2$  減少した。

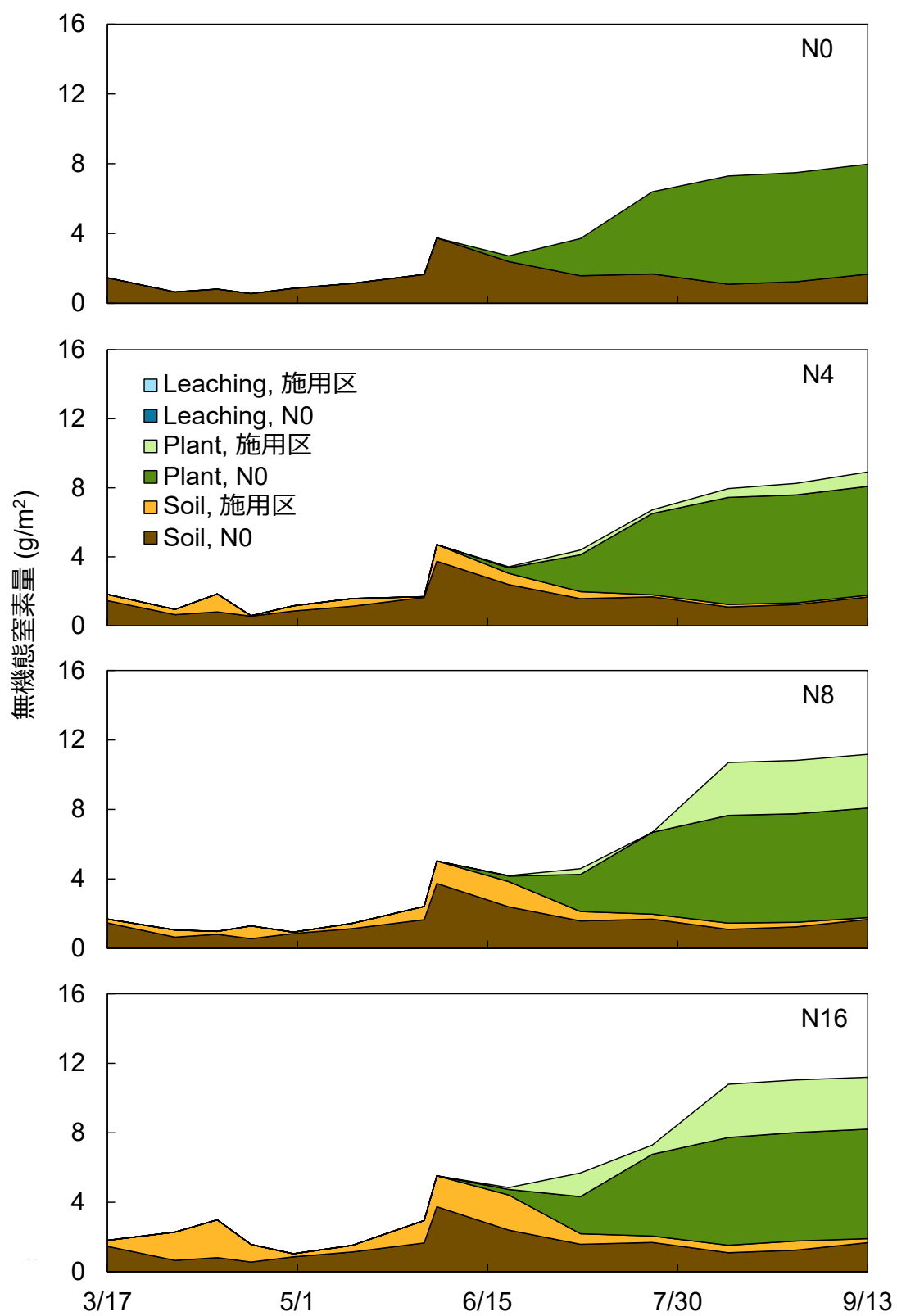


図 3.8.4 各施肥区の窒素収支

### 3-9 まとめ

ここでは、圃場実験での結果についてまとめる。

イネの牛糞堆肥由来の窒素吸収量は、6/20 までわずかしかなかった。7/7 は N16-N0 区だけ大きく増加し、7/24 にかけて減少した。7/24 から出穂期にかけて大きく増加し、そこから収穫にかけて大きな変化はなかった。収穫時の窒素吸収量の増加は、N8-N0, N16-N0, N4-N0 区の順で小さく、それぞれ 3.1, 3.0, 0.8 g/m<sup>2</sup> だった。また、施用した牛糞堆肥由来のうち、N4-N0, N8-N0, N16-N0 区で 20, 38, 19% がイネに吸収されたことが分かった。このことから、N8 区で最も施肥効率がよかったことが分かった。

収量は、N4 区は N0 区より小さく、N8, N16 区は大きかった。また、N8, N16 区の違いは見られなかった。その原因として一穂粒数が大きく影響していた。このことから、N8 区で最も施肥効率がよかったことが分かった。

土中の NH<sub>4</sub>-N のプロファイルは、主に深さ 0-10 cm で増減が目立った。移植（6/3）以降については、6/3-20 にかけて、深さ 0-2 cm は急激に、深さ 2-10 cm は緩やかに減少した。6/20-7/7 にかけて深さ 0-10 cm で減少し、この期間の深さ 0-10 cm での有機物分解速度は、窒素吸収速度より下回ると考えた。逆に 7/7-7/24 にかけて深さ 0-10 cm で増加したことから、深さ 0-10 cm での有機物分解速度は、窒素吸収速度より上回ると考えた。また、7/24-8/11 にかけて深さ 0-10 cm で減少したことから、深さ 0-10 cm での有機物分解速度は、窒素吸収速度より下回ると考えた。8/11-9/13 にかけて、深さ 0-10 cm で増加した。これは、イネの窒素吸収速度がほぼ止まっていることから説明がついた。これらのことから、有機物分解は深さ 0-10 cm で活発に行われていると考えられた。そして、牛糞堆肥施肥量が多いほど NH<sub>4</sub>-N 量が大きい傾向がみられた。

NO<sub>3</sub>-N は、4/12 で全区画深さ 0-2 cm でみられ、N4, N16 区では 1.7, 3.4 mmol/1000cm<sup>3</sup> と全期間、全区画と比べかなり大きかった。これは、無降水期間で乾燥していたことから、好気条件になり硝化が促進されたと考えた。4/20 では N8, N16 区の深さ 10 cm 以深でみられ、4/30 では N4, N16 区の深さ 25 cm でみられた。4/13 以降は断続的な降水があったことから、土中水流れによって表層の NO<sub>3</sub>-N が下方に流れたと考えた。5/31 以降は N8 と N16 区、6/3 以降は N0 と N4 区で深さ 0-10 cm でみられ、深さ 0-2 cm の方が深さ 2-10 cm よりも大きかった。また、深さ 10 cm 以深では見られなかったことから、6/3 以降は、土中水流れによって NO<sub>3</sub>-N が深さ 10 cm 以深に流れ、10 cm 以深で脱窒が起きたと考えた。そして、NH<sub>4</sub>-N と違い、牛糞堆肥施肥量が多いほど大きいといった傾向は見られなかった。

牛糞堆肥由来の NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N を深さ 0-25 cm で和をとった結果、4/12 に N4-N0, N16-N0 区で増加が目立った。代かき前 5/31 の N4-N0, N8-N0, N16-N0 区はそれぞれ 0.0, 0.76, 1.3 g/m<sup>2</sup> だったが、移植 6/3 ではそれぞれ 1.0, 1.3, 1.8 g/m<sup>2</sup> と大きく増加し、このとき NO<sub>3</sub>-N の増加が顕著だった。移植以降は緩やかに減少し、イネの窒素吸収がとまった出穂期 8/11 以降はわずかしかなかった。

## 第4章 数値計算による水田土中の窒素動態

3章の圃場実験では、脱窒を無視できると仮定することで施肥量毎の窒素収支を測定した。本章では、圃場実験で求めきれなかった窒素動態を数値解析で考慮することで、施用した牛糞堆肥の窒素動態を明らかにする。数値計算には、不飽和水分移動汎用プログラム HYDRUS-1D と地球科学反応プログラム PhreeqC を連結したプログラムである HP1 を用いる。計算式やモデルについては、2章に示した。

4-1 節では水分移動の計算で与えた初期条件や計算条件、計算結果を、4-2 節では熱移動の計算で与えた初期条件や計算条件、計算結果を、4-3 節は窒素移動の計算で与えた初期条件や計算条件、計算結果を示す。

### 4-1 水分移動の数値計算

ここでは、土中の水分移動の数値計算をするうえで、与えた初期条件、計算条件や、計算結果を示す。

#### 4-1-1 初期条件と計算条件

##### 〈計算条件〉

計算条件の土層模式図を図 4.1.1 に示す。土層の長さは、下端に地下水があることを想定し 100 cm とした。各土層の深さは、圃場実験の採土深さに基づき、0-2, 2-10, 10-20, 20-30, 30-100 cm とした。上端の境界条件は、日積算降水量と日積算かんがい水量の和を与え、最大水深  $h = 3$  cm とした。また、非栽培期間の蒸発量  $E$  [cm/d]は、3-7-1 節の可能蒸発量  $E_p$  [cm/d]を、栽培期間の  $E$  と蒸散量  $T$  [cm/d]は、3-7-2 節の  $E_p$  と可能蒸散量  $T_p$  [cm/d]を与えた。下端の境界条件は、地下水を想定して一定圧力  $h = -1$  cm とした。

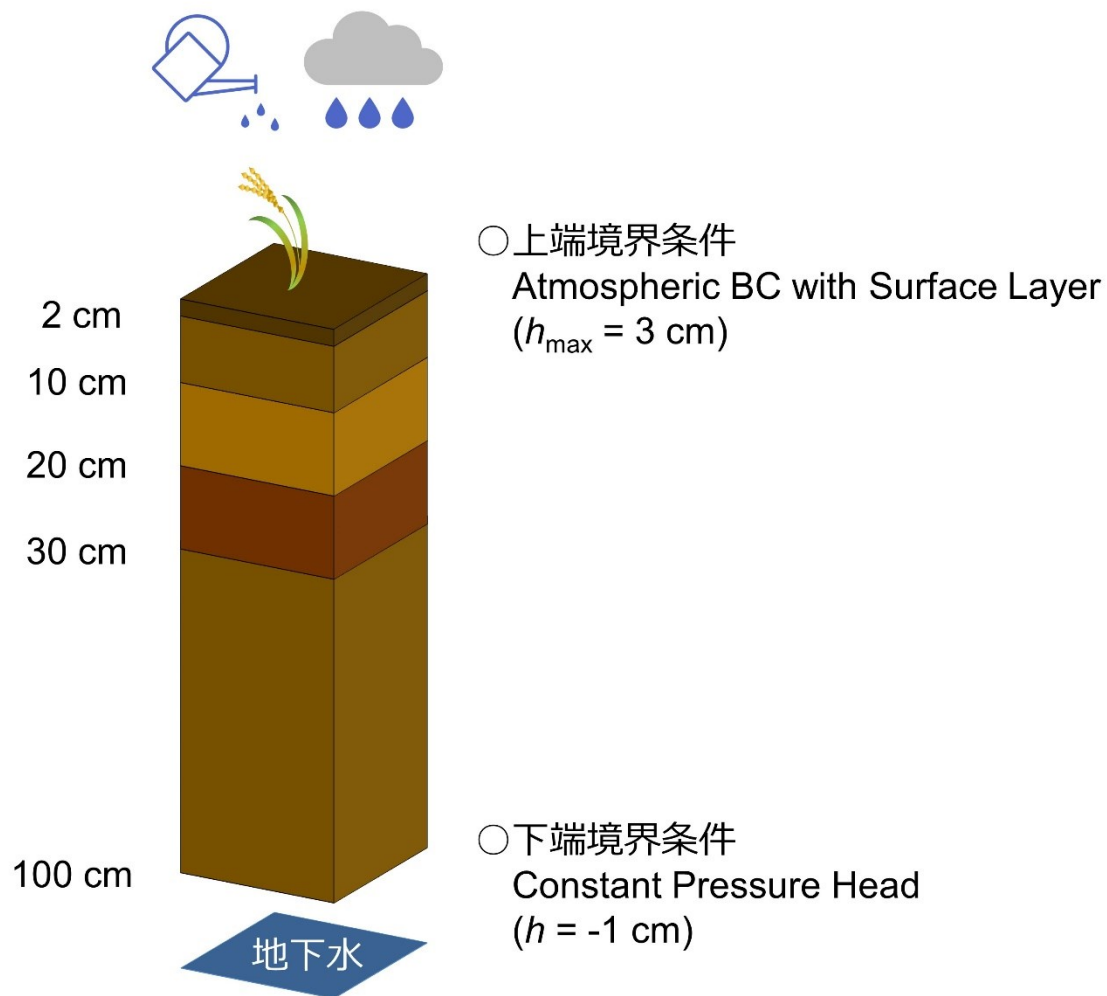


図 4.1.1 計算条件の土層模式図

各土層に与えた水分移動のパラメータを表 4.1.1, 4.1.2 に示す。水分特性関数は、式 3.1.1, 3.1.2 に示した VG モデルを用い、ヒステリシスを考慮しなかった。本章では、数値計算による溶質移動の再現が目的であり、土中の水分量、水分移動は溶質移動に影響する。そのため、水分移動の数値計算結果は、3 章の結果と近似させる必要がある。そこで、深さ 0-20 cm の水分特性曲線、深さ 10-100 cm の飽和透水係数  $K_s$  [cm/d] を圃場の測定結果と変更した。変更後の水分特性曲線を図 4.1.2 に示す。

表 4.1.1 表 3.1.3, 図 3.1.5 の VG モデルのパラメータ

深さ (cm)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (/cm)	n (-)	$K_s$ (cm/d)	$l$ (-)
5	0.45	0	0.0124	1.35	1.74	0.5
15	0.45	0	0.0096	1.29	0.22	0.5
25	0.45	0	0.0138	1.40	1.08	0.5

表 4.1.2 数値計算で与えた VG モデルのパラメータ (変更部は赤字)

深さ (cm)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (/cm)	n (-)	$K_s$ (cm/d)	$l$ (-)
0-2	0.45	0	0.0138	1.60	1.74	0.5
2-10	0.45	0	0.0138	1.60	1.74	0.5
10-20	0.45	0	0.0138	1.40	0.80	0.5
20-30	0.45	0	0.0138	1.40	0.10	0.5
30-100	0.45	0	0.0138	1.40	0.50	0.5

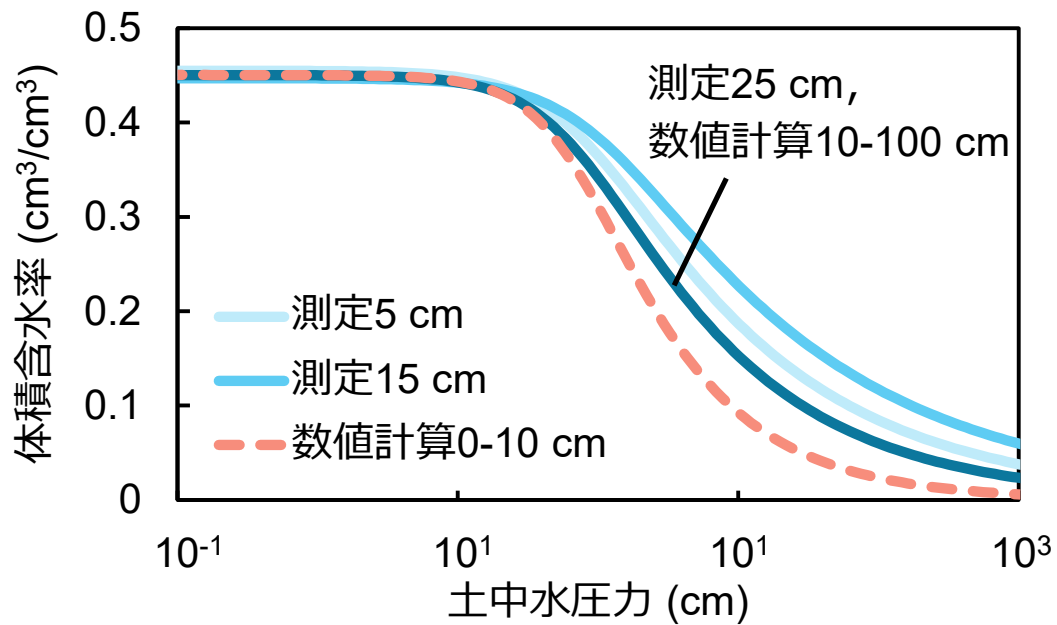


図 4.1.2-a 使用する水分特性曲線

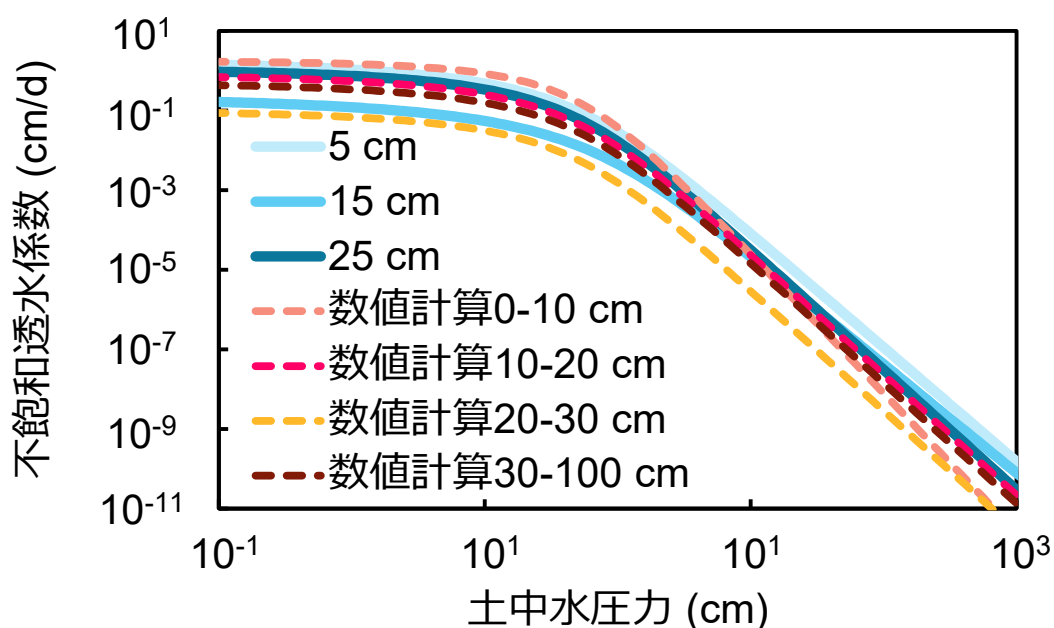


図 4.1.2-b 使用する不飽和透水係数

根の水吸収モデルは Feddes モデルを用い、水ストレス応答関数  $\alpha(h)$  [-] (2-4-3-1 節) は Singh ら (2003) のイネにおける値を使用した。その値を表 4.1.3 に示す。

表 4.1.3 水ストレス応答関数  $\alpha(h)$  のパラメータ (Singh et al., 2003)

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h_{3 \text{ high}}$ [cm]	$h_{3 \text{ low}}$ [cm]	$h_4$ [cm]	$T_{p \text{ high}}$ [cm/d]	$T_{p \text{ low}}$ [cm/d]
100	55	-160	-250	-15000	0.5	0.1

根の深さの伸長は、圃場での生育を想定した値を与えた。その値を表 4.1.4 に示す。

表 4.1.4 根の深さの伸長

移植 6/3 [cm]	分けつ始期 6/20 [cm]	分けつ活性期 7/7 [cm]	成熟期 9/13 [cm]
5.0	20.0	30.0	30.0

計算期間は牛糞堆肥施用 (3/17) から土試料の最終採取日 (9/13) の 180 日間とし、計算時間刻み  $dt$  [d] の最大値を 0.01 /d とした。

### 〈初期条件〉

与えた初期水分量を図 4.1.3 に示す。深さ 5, 15, 25 cm の初期水分量は、3/17 0:10 の測定値を与えた。深さ 0, 100 cm をそれぞれ  $h = -200, -1$  cm とし、各深さ間は線形で増減するとした。

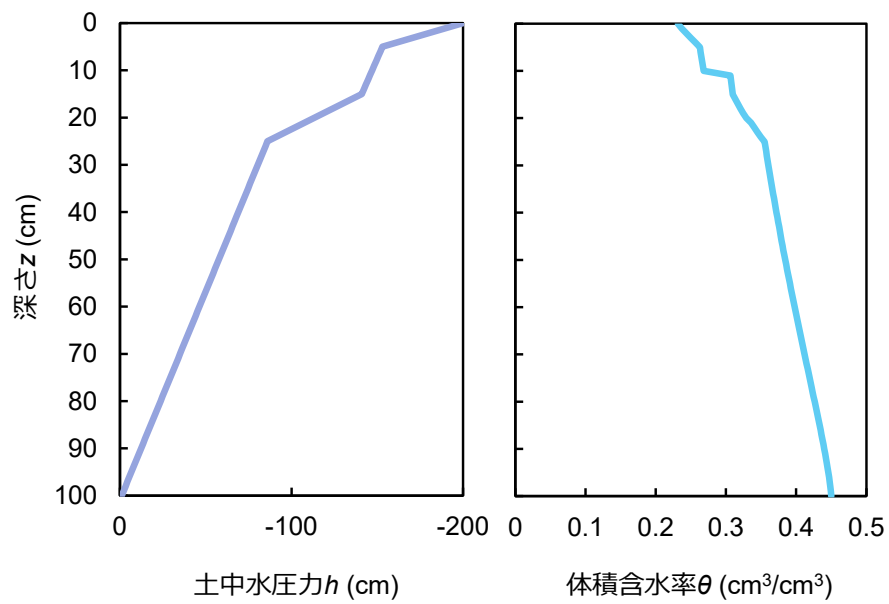


図 4.1.3 与えた初期水分量

#### 4-1-2 体積含水率 $\theta$

深さ 5, 15, 25 cm の体積含水率  $\theta$  [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ] の、時刻 0:10 の測定値と時刻 0:00 の計算値を図 4.1.4 に示す。

全深度の  $\theta$  の計算値は、4/4-13 の無降水、乾燥期間を含め測定値を概ね表せた。しかし、8 月以降の測定値のわずかの減少は表すことが出来なかった。



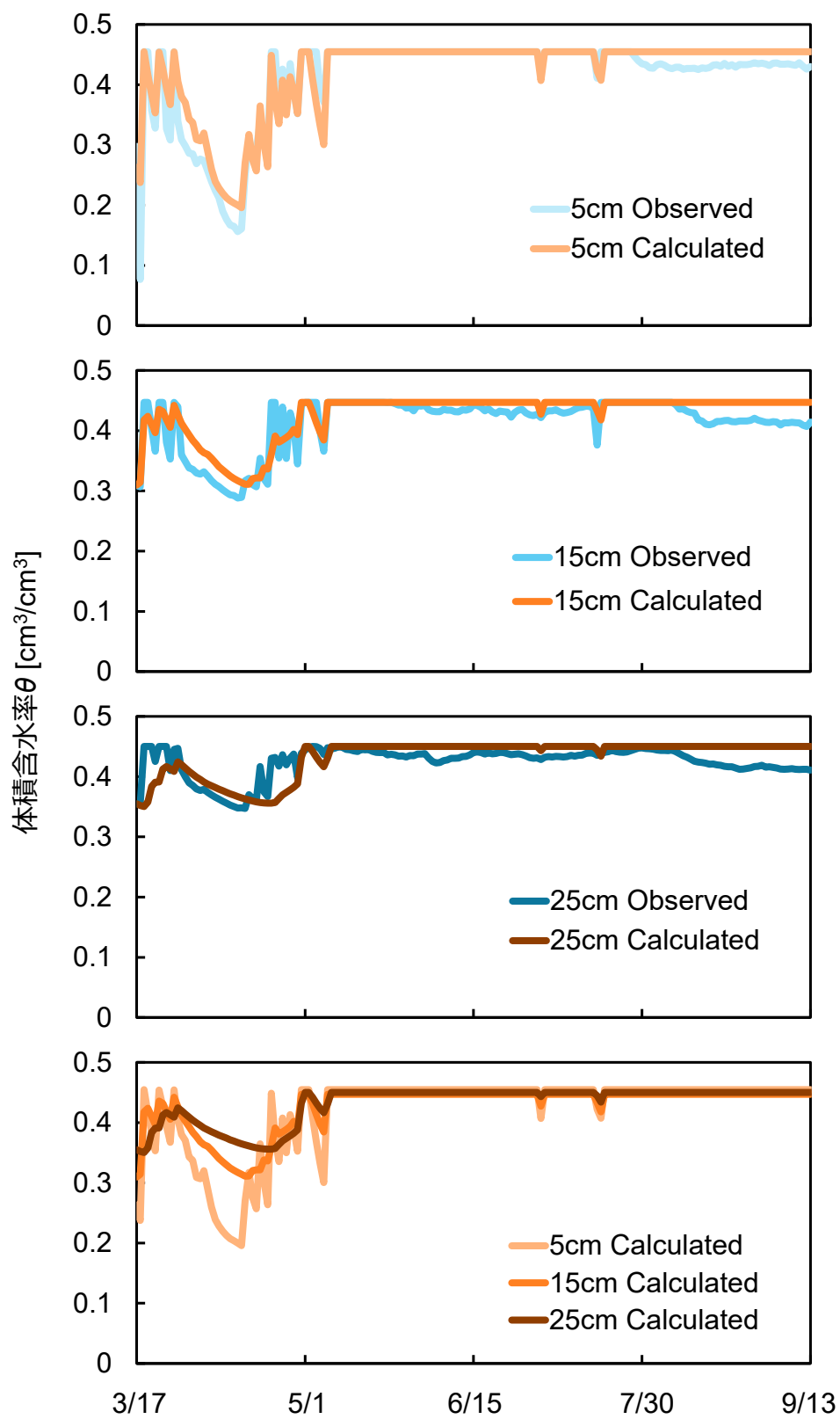


図 4.1.4 体積含水率  $\theta$

### 4-1-3 水深

水深の測定値と計算値を図 4.1.5 に示す。

測定値の栽培期間以降（6/3-）で湛水を維持できなかった 7/2 15:40-7/3 12:20, 7/11 11:50-7/12 7:30, 7/15 21:50-7/19 5:10 のうち、計算値では 7/2-7/3, 7/17-7/18 を非湛水として表すことが出来た。

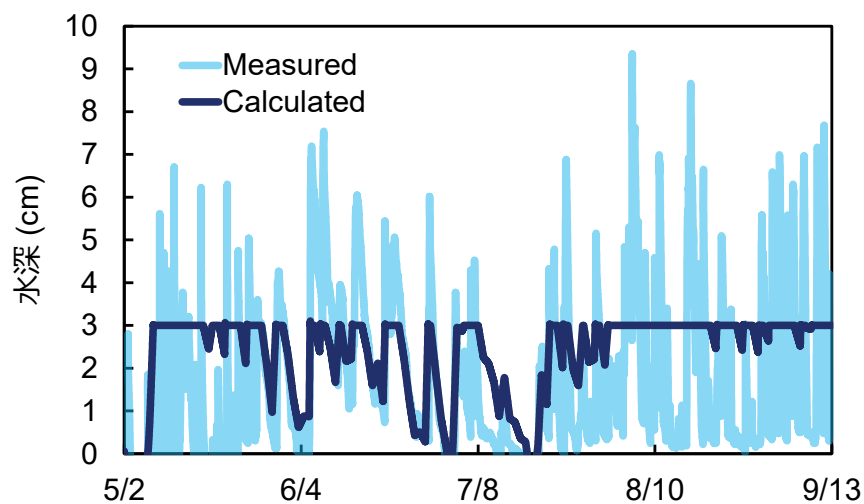


図 4.1.5 水深

### 4-1-4 実蒸発量 $E_a$ と可能蒸散量 $T_a$

可能蒸発量  $E_p$  [cm/d]と数値計算による実蒸発量  $E_a$  [cm/d]を図 4.1.6, 可能蒸散量  $T_p$  [cm/d]と数値計算による実蒸散量  $T_a$  [cm/d]を図 4.1.7 に示す。

$E_a$  は、4/6-4/13 を除いて  $E_p = E_a$  となった。

$T_a$  は、全期間で  $T_p = T_a$  となった。

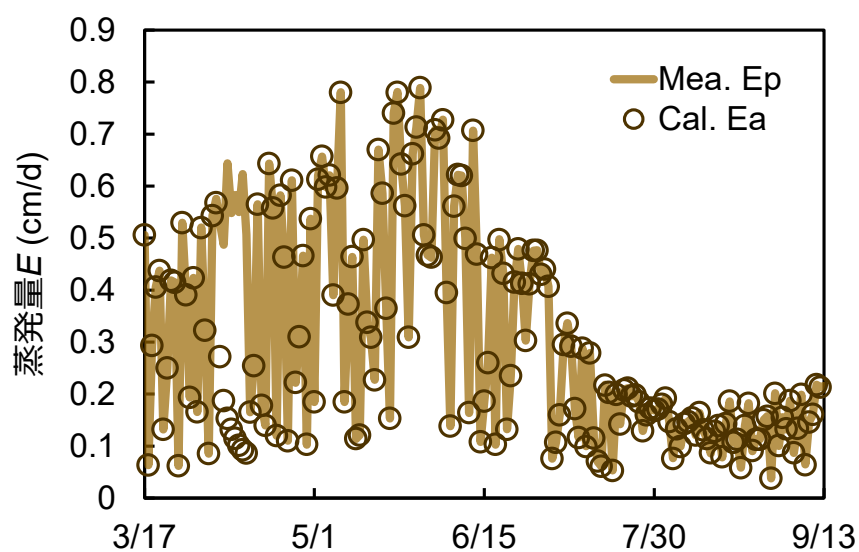


図 4.1.6 蒸発量  $E$

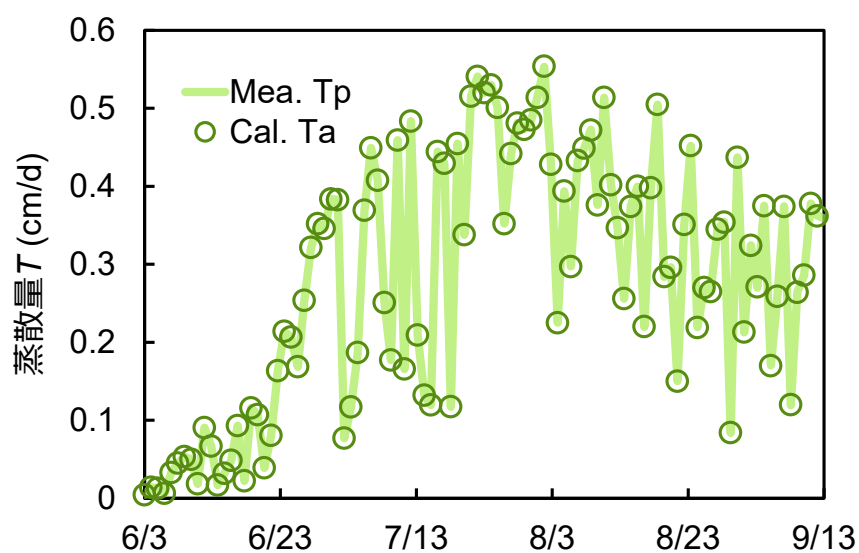


図 4.1.7 蒸散量  $T$

#### 4-1-5 下方浸透水量 $J_w$

深さ 25 cm の下方浸透水量  $J_w$  [cm/d] (下向き正) の、測定値から求めた計算値 (3-7-3 節) と、数値計算で求めた計算値を図 4.1.8 に示す。

3/19-3/28 の数値計算で求めた計算値は、測定値から求めた計算値を表せなかった。

4/6-4/23 の数値計算で求めた計算値は、平均-0.007 cm/d と、わずかに上向きとなった。

湛水期間 (5/2-) 以降は概ね 0.3 cm/d で飽和定常流れとなっていた。7/7, 7/18-7/19 では 0.0 cm/d に近づいた。

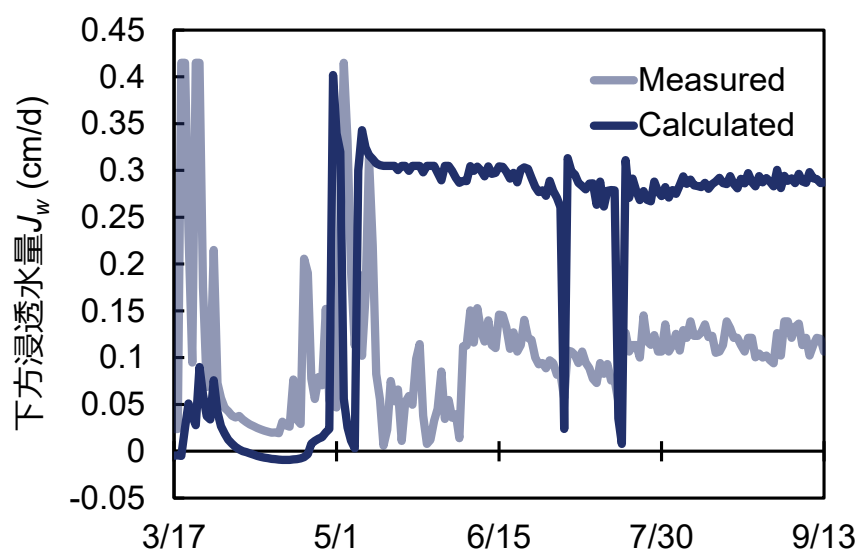


図 4.1.8 深さ 25 cm の下方浸透水量  $J_w$  (下向き正)

#### 4-1-6 表面流出量 $R$

表面流出量  $R$  [cm]の数値計算で求めた計算値と、3-7-5 節の不明水を測定値として図 4.1.9 に示す。

$R$  は、不明水と同じ傾向を表すことが出来た。これにより、圃場の深さ 25 cm 付近の水が横向きに流れ、人口畔の外側の土へ流れ込んだと考えた不明水は、数値計算では  $R$  として表したことになる。

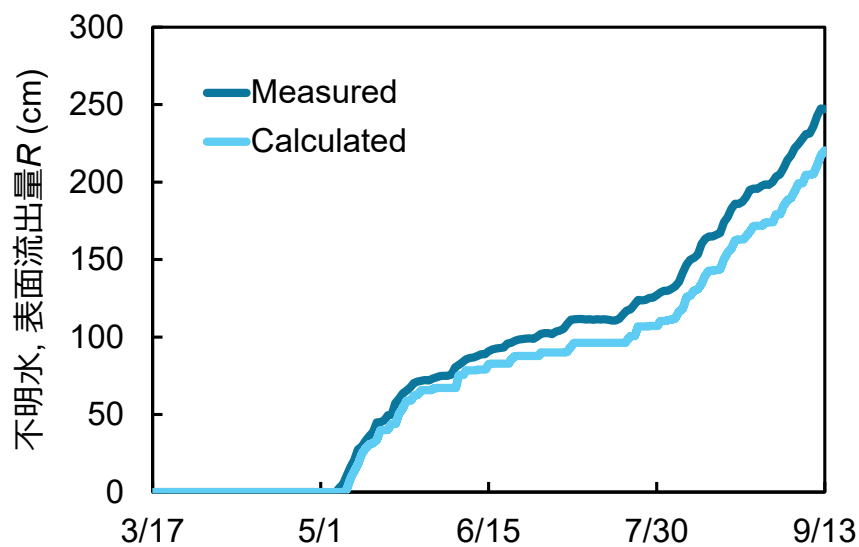


図 4.1.9 不透明水 (3-7-5 節) と数値計算の表面流出量  $R$

#### 4-1-7 水収支

式 3.7.5 の水収支式を用い、数値計算による地表面から 25 cm までの水収支を求めた。降水量  $P$  と灌漑水量  $I$  の和を積算流入量として折れ線で、蒸発量  $E$ 、蒸散量  $T$ 、下方浸透水量  $J_w$ 、表面流出量  $R$ 、貯留変化量  $\Delta W_s$ 、水深変化量  $\Delta W_l$  を積み上げ図として図 4.1.10 に示す。

9/13 の  $E+T+J_w+R+\Delta W_s+\Delta W_l$  の内訳は、それぞれ 15.3, 8.1, 11.1, 63.4, 1.2, 0.9 % となった。

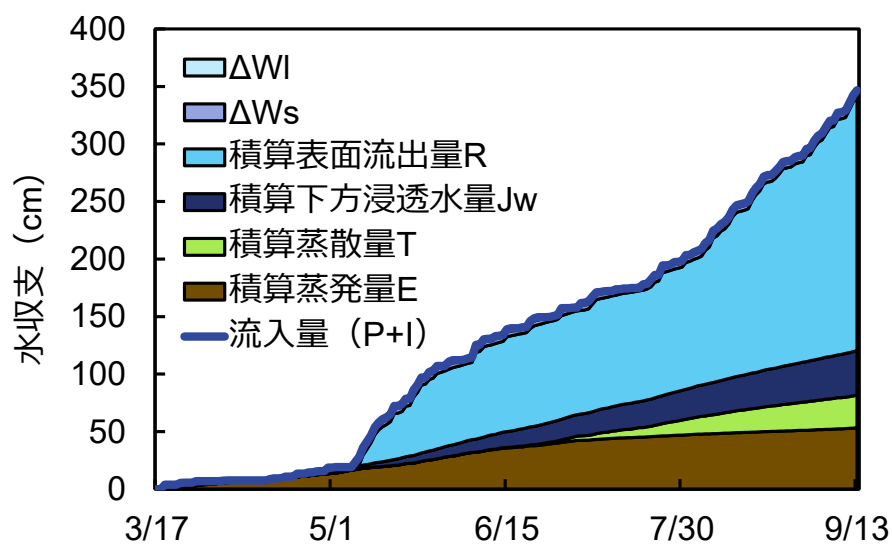


図 4.1.10 数値計算による水収支

## 4-2 熱移動の数値計算

ここでは、土中の熱移動の数値計算をするうえで、与えた初期条件、計算条件や、計算結果を示す。なお、水分移動の数値計算に用いた初期条件、計算条件は同じである。

### 4-2-1 初期条件と計算条件

#### 〈計算条件〉

上端の境界条件は温度境界（Temperature BC）を与え、上端（地表面）の温度を測定値の深さ 5 cm の日平均地温+1 °C（図 4.2.1），振幅は測定値の深さ 5 cm の地温と同じとした。下端の境界条件は温度境界（Temperature BC）を与え、下端（100 cm）の温度は 15 °C で一定とした。

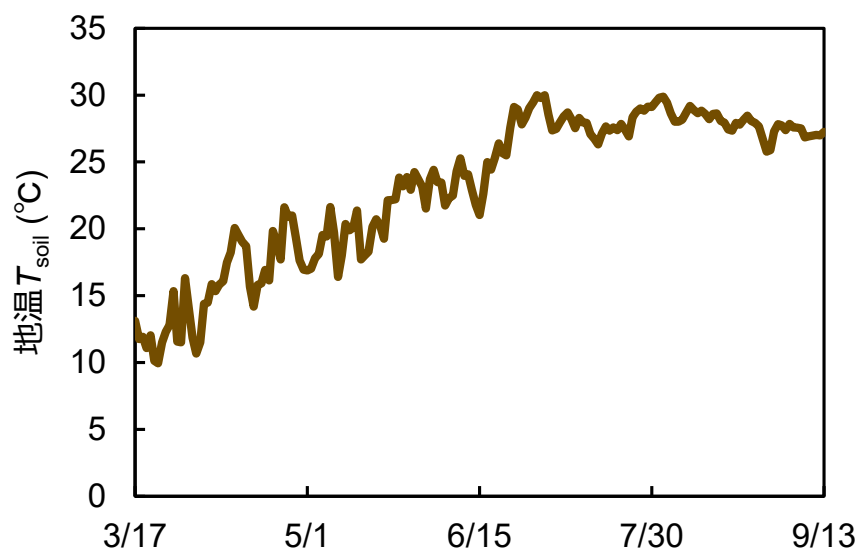


図 4.2.1 与えた地表面温度

各土層に与えた熱移動のパラメータを表 4.2.1 に示す。熱伝導率  $\lambda_0(\theta)$  [ $\text{kg}\cdot\text{cm}/(\text{d}^3\cdot\text{K})$ ]は Chung and Horton (式 2.1.6)を与えた。パラメータは HYDRUS 内部にある Loam の値を与えたが、本章では数値計算による溶質移動の再現が目的であること、土中の温度は窒素の形態変化に影響することを踏まえ、一部のパラメータを変更し熱移動の数値計算結果を測定値と近似させた。各土層の  $\lambda_0(\theta)$ を図 4.2.2 に示す。

表 4.2.1 与えた熱移動のパラメータ

深さ (cm)	固相の体積割合 $\theta_{\text{solid}}$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	熱分散率 $\beta$ (cm)	$b_1$ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}/(\text{d}^3\cdot\text{K})$ )	$b_2$ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}/(\text{d}^3\cdot\text{K})$ )	$b_2$ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}/(\text{d}^3\cdot\text{K})$ )
0-2	0.57	5	1.56E+16	2.53E+16	9.89E+16
2-10	0.57	5	1.56E+16	2.53E+16	9.89E+16
10-20	0.57	5	1.56E+16	2.53E+16	7.89E+16
20-30	0.57	5	1.56E+16	2.53E+16	2.89E+16
30-100	0.57	5	1.56E+16	2.53E+16	2.89E+16

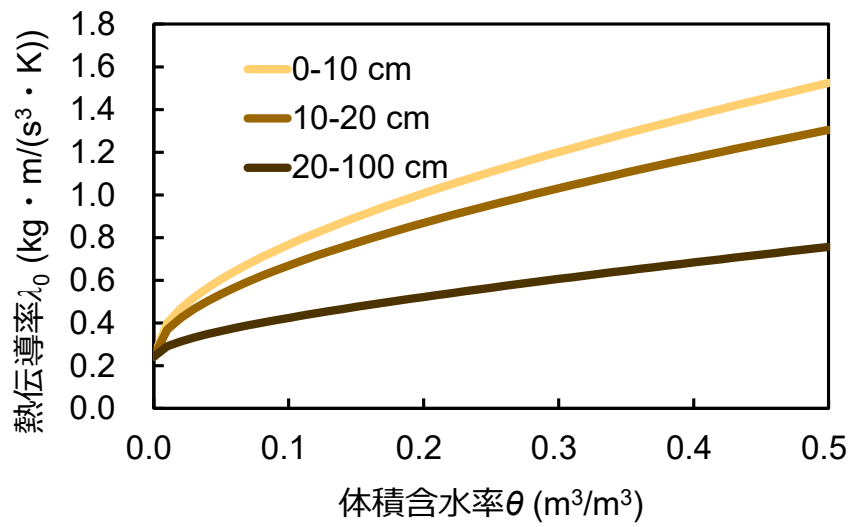


図 4.2.2 熱伝導率  $\lambda_0(\theta)$

### 〈初期条件〉

与えた初期地温を図 4.2.3 に示す。深さ 5, 15, 25 cm の地温は、3/17 0:10 の測定値を与えた。深さ 0, 100 cm をそれぞれ  $T_{\text{soil}} = 3/17$  0:10 の深さ 5 cm の  $T_{\text{soil}}+1$ , 15 °C とし、各深さ間は線形で増減するとした。

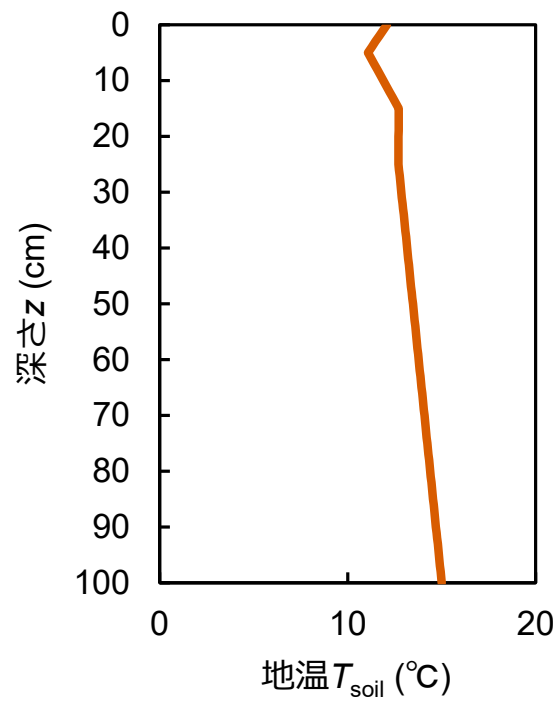


図 4.2.3 与えた初期地温  $T_{\text{soil}}$

#### 4-2-2 地温 $T_{\text{soil}}$

深さ 5, 15, 25 cm の地温  $T_{\text{soil}}$  [°C] の、時刻 0:10 の測定値と時刻 0:00 の計算値を図 4.2.4 に示す。

全深度の  $T_{\text{soil}}$  の計算値は、測定値を概ね表すことが出来た。



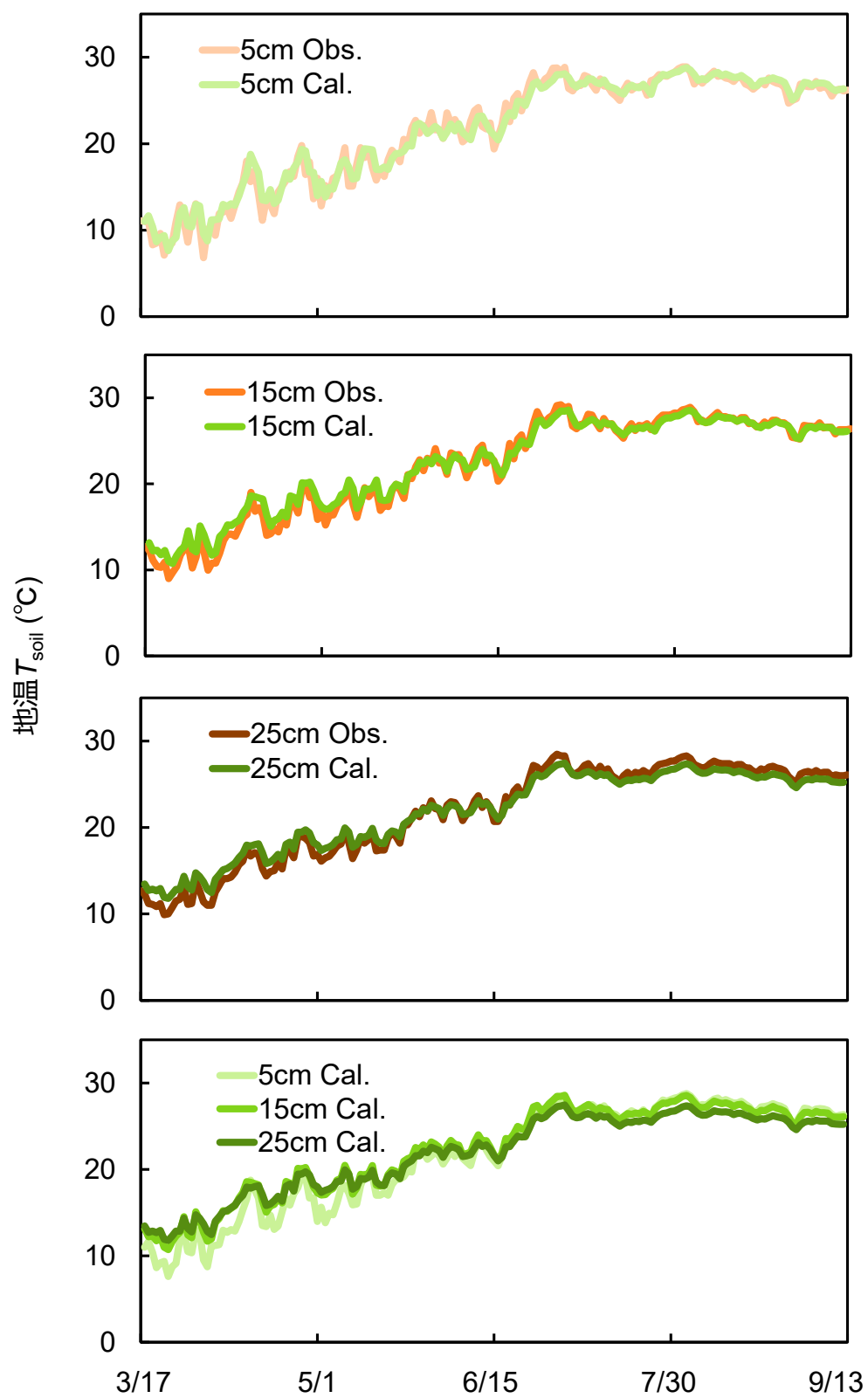


图 4.2.4 地温  $T_{\text{soil}}$

### 4-3 牛糞堆肥由来の窒素移動の数値計算

ここでは、土中の牛糞堆肥由来の窒素移動（N4-N0, N8-N0, N16-N0 区）の数値計算をするうえで、与えた初期条件、計算条件や、計算結果を示す。本研究では、土中の溶質として  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2$  を与えた。なお、水分・熱移動の数値計算に用いた初期条件、計算条件は同じである。

#### 4-3-1 計算条件

上下端に与えた溶質濃度を表 4.3.1, 各土層に与えた溶質移動のパラメータを表 4.3.2 に示す。

上端、下端の境界条件はフラックス境界（Concentration Flux BC）とし、上端すなわち降水に含まれる溶質濃度と、下端すなわち地下水濃度は、牛糞堆肥施肥区と無施肥区では違いないため 0 mol/L とした。

乾燥密度  $\rho_b$  [ $\text{g}_{\text{soil}}/\text{cm}^3$ ] は、表 3.1.3 より圃場の値を与えた。分散長  $\lambda$  [cm], 自由水中の分子拡散係数  $D_w$  [ $\text{cm}/\text{d}$ ] は全層で同じ値とした。

表 4.3.1 上下端に与えた溶質濃度

	$\text{NH}_4^+$ (mol/L)	$\text{NO}_3^-$ (mol/L)	$\text{N}_2$ (mol/L)
上端	0.0	0.0	0.0
下端	0.0	0.0	0.0

表 4.3.2 与えた溶質移動のパラメータ

深さ (cm)	乾燥密度 $\rho_b$ ( $\text{g}_{\text{soil}}/\text{cm}^3$ )	分散長 $\lambda$ (cm)	自由水中の分子拡散係数 $D_w$ (cm/d)
0-2	1.27	10	2
2-10	1.27	10	2
10-20	1.45	10	2
20-30	1.42	10	2
30-100	1.42	10	2

図 3.8.3 より、代かき前後（5/31-6/3）で牛糞堆肥由来の窒素が大きく増加した。そこで、計算期間を堆肥施用から代かき前（3/17-5/31）、移植以降（6/3-）の 2 期間に分けた。

#### 4-3-1-1 吸着等温線モデル

吸着特性のモデルは、吸着等温線モデルの線形吸着等温線（式 2.1.14）を用いた。 $\text{NH}_4^+$ のみ土に吸着するとし、分配係数  $K_d$  [ $\text{cm}^3/\text{g}_{\text{soil}}$ ]は、式 3.8.2 より全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  に対する溶存  $\text{NH}_4\text{-N}$  の割合が 0.06742 となるようにした。HP1 では平衡定数  $\log k$  を用いて与えるため、次式で計算した。

$$\log k = \log \frac{K_d \times \rho_s}{\langle \text{Sor} \rangle_{\text{all}}} \quad \text{式 4.3.1}$$

ここで、 $\langle \text{Sor} \rangle_{\text{all}}$  [ $\text{mol}/\text{cm}^3_{\text{soil}}$ ]は土単位体積当たりの吸着サイト数である。 $K_d$ ,  $\log k$ ,  $\langle \text{Sor} \rangle_{\text{all}}$ を表 4.3.3 に示す。

表 4.3.3 与えた線形吸着等温線モデルのパラメータ

深さ (cm)	分配係数 $K_d$ ( $\text{g}_{\text{soil}}/\text{cm}^3$ )	平衡定数 $\log k$	吸着サイト数 $\langle \text{Sor} \rangle_{\text{all}}$ ( $\text{mol}/\text{cm}^3_{\text{soil}}$ )
0-10	10.87	-98.8591	1.0E100
10-20	9.55	-98.8026	1.0E100
20-100	9.72	-98.8106	1.0E100

#### 4-3-1-2 無機化

##### 〈温度依存性〉

無機化の温度依存性を表す式として、永源モデル（式 2.3.19）を用いた。 $0^\circ\text{C}$ のときの無機化速度定数  $k_{\min}$  すなわち  $A$  [ $\text{d}$ ]は、永源（2022）に倣い、 $0^\circ\text{C}$ での土壤微生物の働きは緩やかであると仮定して  $A = 0.0001$  [ $\text{d}$ ]とした。よって、無機化の温度依存性（水分量が影響しないとき）を次式で表した。

$$k_{\min} = 0.0001 \exp(BT) \quad \text{式 4.3.2}$$

$B$  [ $^\circ\text{C}$ ]は 0.01 刻みで変更し、2 乗平均平方根誤差 RMSE（式 4.3.3）が最も小さくなるようにした。比較対象は、3/17-5/31 は計算値の深さ 1, 6 cm の土中全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  と測定値の深さ 0-2, 2-10 cm とした。このとき、N4-N0 区については 5/14 から 5/31 にかけてのプロファイルが N8-N0, N16-N0 区と異なるため、5/31 を除いた。6/3-9/13 は、イネの窒素吸収量の計算値が測定値と一致することを条件として加えた（4-3-1-5 節）。

$$\text{RMSE} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 4.3.3}$$

ここで、 $N$ は測定回数、 $P_i$ 、 $Q_i$ はそれぞれ土中の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  の計算値と測定値である。

### 〈水分依存性〉

無機化の水分依存性を表す式として、Johnsson モデル（式 2.3.23）を用いた。各パラメータを表 4.3.4、図 4.3.1 に示す。 $\theta_s [\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ は表 4.1.2 より、全深度同一の  $0.45 [\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ である。 $\theta_{\text{low}}$ 、 $\theta_{\text{high}} [\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ は、図 2.3.9 の木村（2017）、岡田（2021）を参考に、それぞれ水分飽和度の 50、60 %とした。また、表 4.3.4 は Brady and Weil（2017）と概ね一致した。

表 4.3.4 与えた水  $k_{\text{min}}$  の分依存性のパラメータ

$\theta_{\text{wilt}}$	$\theta_{\text{low}}$	$\theta_{\text{high}}$	$\theta_s$	$e_s$ ( $\theta_s$ の $e_m$ )
0.00	0.23	0.28	0.45	0.60

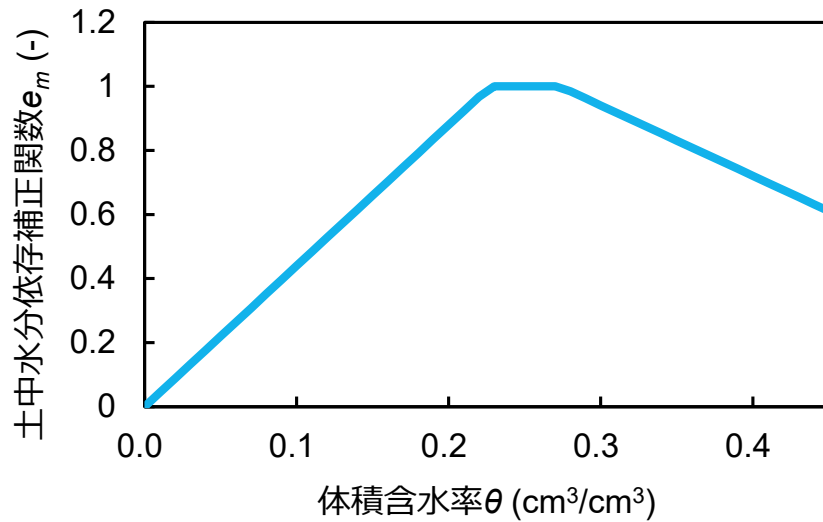


図 4.3.1 与えた土中水分依存補正関数  $e_m$

以上より、 $k_{\text{min}}(T, \theta)$ を温度・水分依存性を考慮した次式で表した。

$$k_{\text{min}}(T, \theta) = 0.0001 \exp(BT) \times e_m \quad \text{式 4.3.4}$$

### 4-3-1-3 硝化

#### 〈温度依存性〉

硝化の温度依存性は、図 2.3.10 の渡辺ら（2019）、中村ら（2007）を参考に、硝化温度依存補正関数  $f_n(T)$  [-] を決定した（図 4.3.2）。 $f_n(T)$  は硝化速度定数  $k_{\text{nit}}$  [1/d] に乗じて与え、25 °C で  $f_n(25\text{ °C}) = 1$  とした。

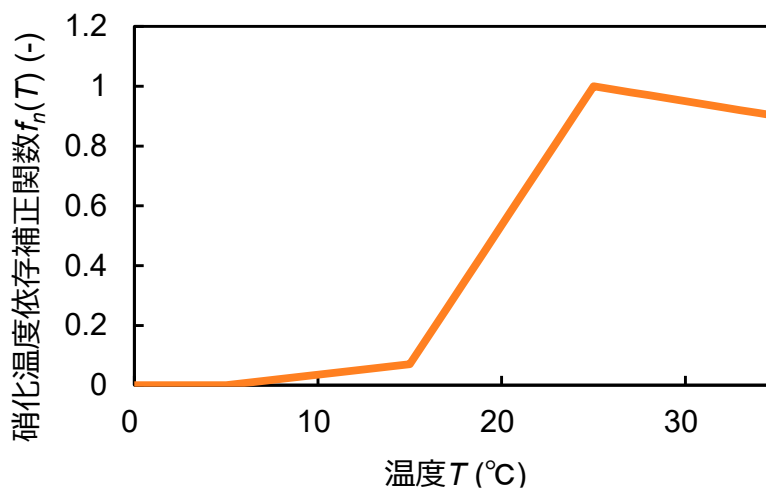


図 4.3.2 与えた硝化温度依存補正関数  $f_n(T)$

#### 〈水分依存性〉

硝化の水分依存性は、図 2.3.11 の武藤ら（2019）を参考に、硝化水分依存補正関数  $f_n(\theta)$  [-] を決定した（図 4.3.3）。 $f_n(\theta)$  は硝化速度定数  $k_{\text{nit}}$  [1/d] に乗じて与え、 $\theta = 0.30$ （水分飽和度 66 %）で  $f_n(0.30) = 1$  とした。また、 $f_n(\theta)$  は Brady and Weil（2017）と概ね一致した。

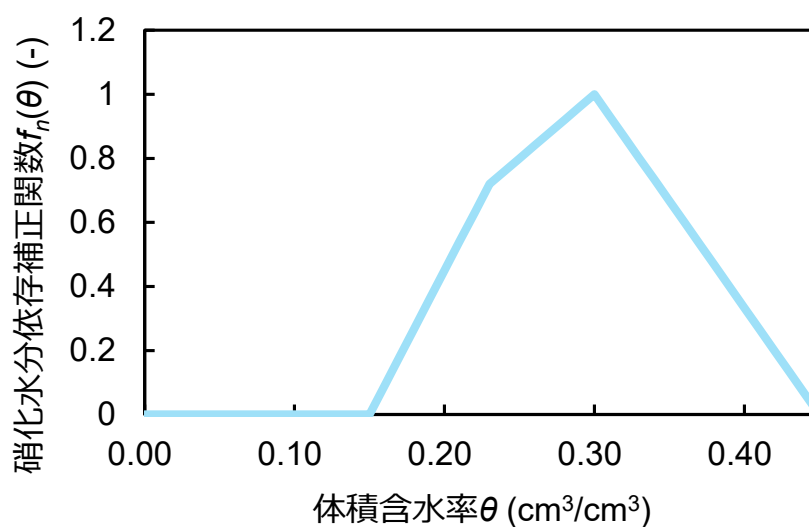


図 4.3.3 与えた硝化水分依存補正関数  $f_n(\theta)$

以上より、 $k_{\text{nit}}(T, \theta)$ を温度・水分依存性を考慮して次式で表した。

$$k_{\text{nit}}(T, \theta) = k_{\text{nit}}(25, 0.30) \times f_n(T) \times f_n(\theta) \quad \text{式 4.3.5}$$

ここで、 $k_{\text{nit}}(25, 0.30)$ は  $T = 25$  [°C],  $\theta = 0.30$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]の硝化速度定数で、本研究では武藤ら (2019) を参考に 0.16 [d]とした。また、栽培期間以降 (6/3-) は表層 0-2 cm に酸化層があると仮定し、 $f_n(\theta) = 1$  とした。

#### 4-3-1-4 脱窒 〈温度依存性〉

脱窒の水分依存性は、Bremner (1958), 松山ら (1982), Brady and Weil (2017) を参考に、脱窒温度依存補正関数  $f_d(T)$  [-]を決定した (図 4.3.4)。 $f_d(T)$ は脱窒速度定数  $k_{\text{den}}$  [d]に乗じて与えろとし、 $T > 20$  °Cで  $f_d(T > 20$  °C) = 1 とした。

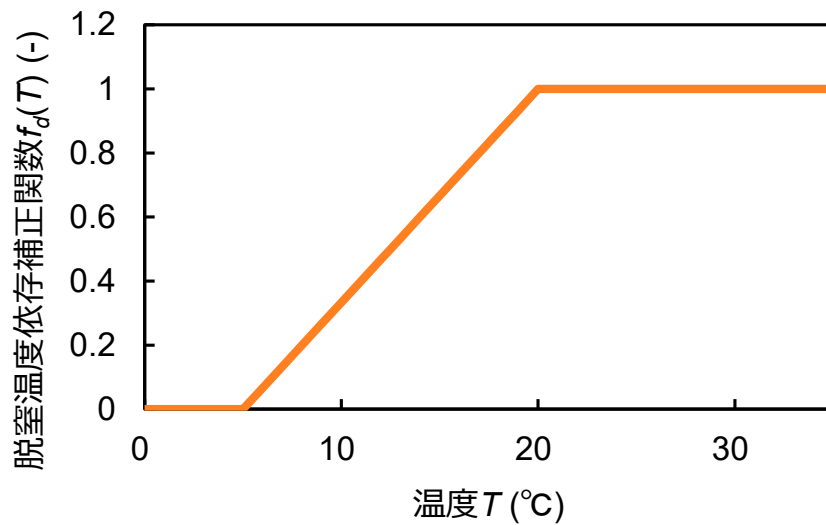


図 4.3.4 与えた脱窒温度依存補正関数  $f_d(T)$

#### 〈水分依存性〉

脱窒の水分依存性は、Bremner (1958), Brady and Weil (2017) を参考に、脱窒水分依存補正関数  $f_d(\theta)$  [-]を決定した (図 4.3.5)。 $f_d(\theta)$ は脱窒速度定数  $k_{\text{den}}$  [d]に乗じて与えろとし、水分飽和度 60 % ( $\theta = 0.27$ ) で  $f_d(0.27) = 0$ ,  $\theta = \theta_s$  で  $f_d(\theta_s) = 1$  とした。

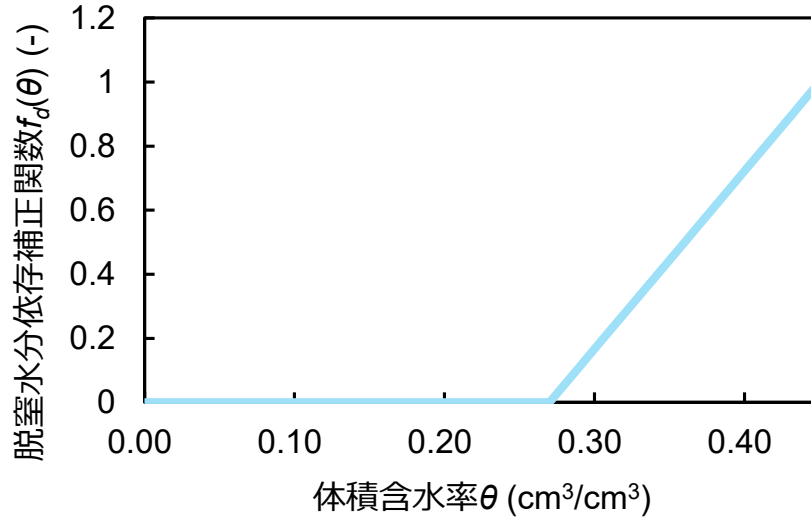


図 4.3.5 与えた硝化温度依存補正関数  $f_d(T)$

以上より、 $k_{\text{den}}(T, \theta)$ を温度・水分依存性を考慮して次式で表した。

$$k_{\text{nit}}(T, \theta) = k_{\text{nit}}(T > 20, \theta_s) \times f_d(T) \times f_d(\theta) \quad \text{式 4.3.6}$$

ここで、 $k_{\text{nit}}(T > 20, \theta_s)$ は  $T > 20^\circ\text{C}$ 、 $\theta = \theta_s$ の脱窒速度定数で、本研究では  $0.1 [\text{d}]$ とした。また、栽培期間以降（6/3-）は表層 0-2 cm に酸化層があると仮定し、 $f_d(\theta) = 0$ とした。

#### 4-3-1-5 イネの窒素吸収

イネの窒素吸収の計算式を次式で定義した。

$$\text{Uptake-N}(t) = P_a^{\text{NO}_3^-}(t) + P_a^{\text{NH}_4^+}(t) + A_a^{\text{NH}_4^+}(t) \quad \text{式 4.3.7}$$

ここで、 $\text{Uptake-N}(t) [\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{d})]$ は測定値より求めた単位時間単位体積当たりの窒素吸収量、 $P_a^{\text{NO}_3^-}(t)$ 、 $P_a^{\text{NH}_4^+}(t) [\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{d})]$ は単位時間単位体積当たりの  $\text{NO}_3^-$ 、溶存  $\text{NH}_4^+$ の受動吸収量、 $A_a^{\text{NH}_4^+}(t) [\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{d})]$ は単位時間単位体積当たりの溶存  $\text{NH}_4^+$ の能動吸収量である。 $\text{Uptake-N}(t)$ は深さによらず均一とした、 $P_a^{\text{NO}_3^-}(t)$ 、 $P_a^{\text{NH}_4^+}(t)$ は溶質の最大吸収濃度  $C_{\text{max}}$ を与えずに式 2.4.25 で与えた。また、単位体積当たりの溶存  $\text{NH}_4^+$ が  $A_a^{\text{NH}_4^+}$ より少ない場合、 $A_a^{\text{NH}_4^+}$ は残存している溶存  $\text{NH}_4^+$ だけしか吸収できず、 $\text{Uptake-N}$ を満たすことができないのが問題である。上式の間接図を図 4.3.6 に示す。

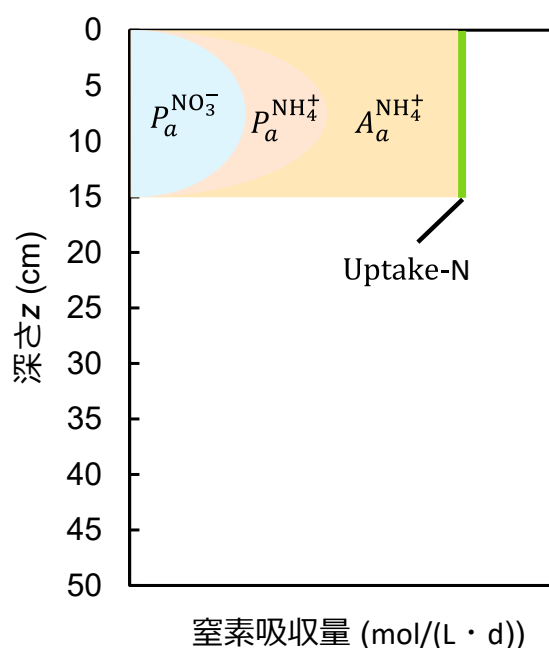


図 4.3.6 イネの窒素吸収の概念図

$\text{Uptake-N}(t)$ は、単位時間単位面積当たりの窒素吸収量  $[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ に根の深さを割ることで求める。堆肥由来の窒素吸収量は、牛糞堆肥施用区から無施肥  $\text{N0}$  区の値を引くことで求めたため、ここでの根の深さは、施肥区と無施肥区の根密度に違いがある深度であるとした。本研究では、収穫前 9/12 のサンプラーによる採土時に深さ 15 cm 以深が硬かったことを踏まえ、表 4.3.5 に示す仮定した値を与えた。

表 4.3.5 与えた施肥区と無施肥区の根密度に違いがある深度

移植 (6/3)	分けつ始期 (6/20)	分けつ活性期以降 (7/7-)
0 cm	10 cm	15 cm

また、牛糞堆肥由来の窒素吸収量  $[\text{g}/\text{m}^2]$ は、図 3.5.6 より 7/24 (分けつ活性期) は 7/7 (分けつ始期) に比べ減少していたが、永源 (2022) の測定結果は増加していたことを踏まえ、7/24 の牛糞堆肥由来の窒素吸収量は 7/7 と 8/11 (幼穂形成期) で線形補完した。

#### 4-3-2 初期条件

与えた牛糞堆肥施肥量  $\text{Som}$  を図 4.3.7,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$   $[\text{mol}/\text{L}]$ を図 4.3.8 に示す。

$\text{Som}$  は、全量が施肥時に易分解性有機物量であるとした。圃場実験より深さ 0-10 cm に均一で与え、土中水流れによって下方に流れないようにした。6/3 については、3/17 に与えた  $\text{Som}$  から、3/17-5/31 に数値計算で分解された  $\text{Som}$ , 5/31-6/3 に測定値で増加した牛糞堆肥由



来の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  を引くことで求めた。

深さ 0-2, 2-10, 10-20, 20-30 cm の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  は、深さ 0-2, 2-10, 10-20, 20-25 cm の測定値とし、牛糞堆肥施肥区と N0 区との差分を与えた。深さ 30 cm 以深の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  は、それぞれ 0.0, 0.0 [mol/L] とした。

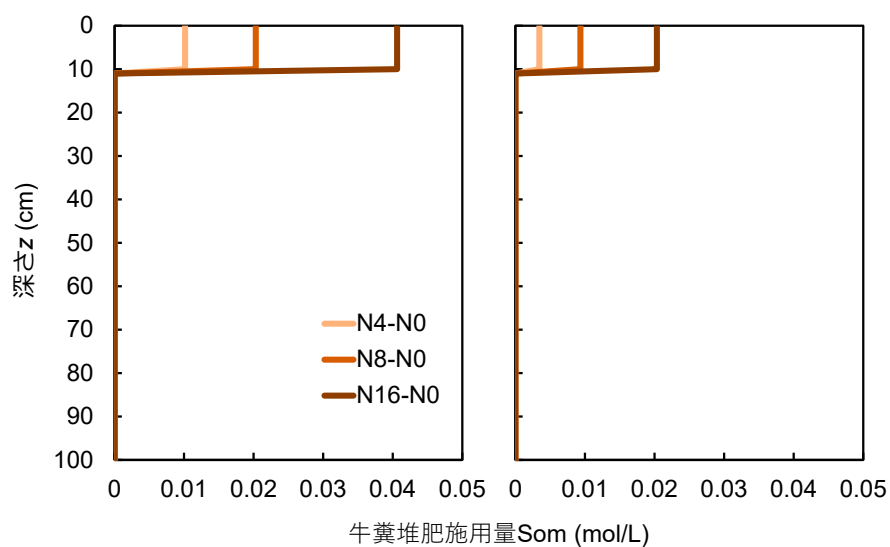


図 4.3.7 与えた初期牛糞堆肥施肥量 Som

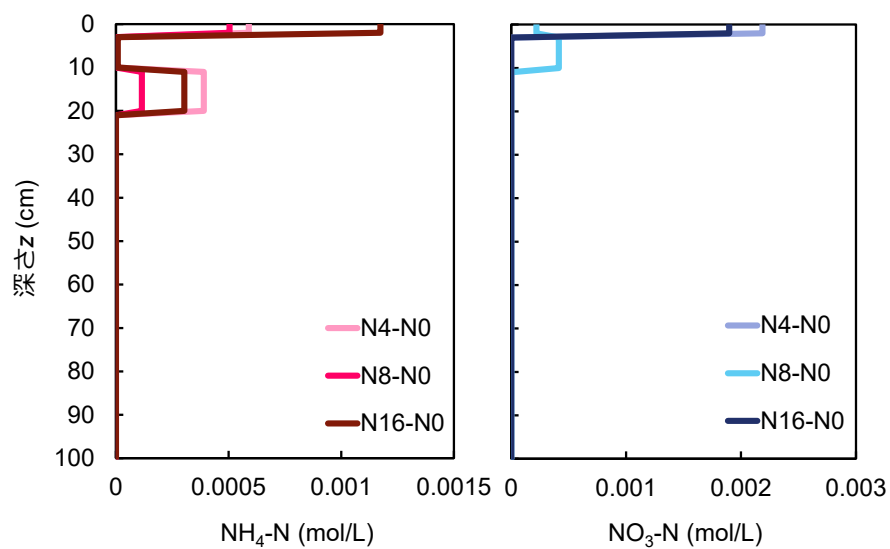


図 4.3.8-a 3/17 に与えた初期  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$

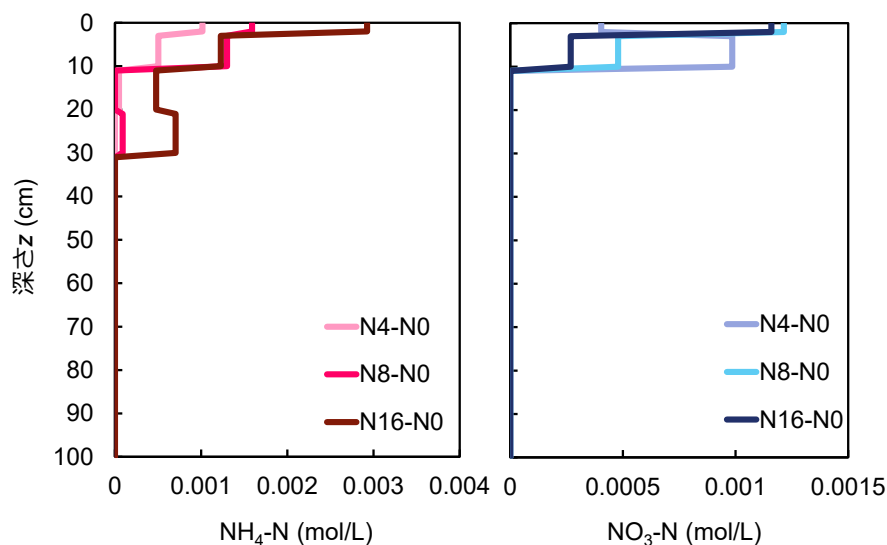


図 4.3.8-b 6/3 に与えた初期  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$

### 4-3-3 土中の $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ のプロファイル

ここでは、数値計算による  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  のプロファイルを測定値と比較する。なお、測定値は初期条件と同様に、牛糞堆肥施肥区と N0 区との差分とした。

#### 4-3-3-1 $\text{NH}_4\text{-N}$ のプロファイル

施肥量毎の全量  $\text{NH}_4\text{-N}$  のプロファイルの測定値と計算値を図 4.3.9 に示す。

N4-N0 区の数値計算は、5/14 まで概ね表せた。5/31 は過大評価したが、N8-N0, N16-N0 区の測定値は 5/14-5/31 にかけて深さ 0-10 cm で増加しているため、概ね表せたのではないかと考えられる。6/3-6/20 にかけては増加として表すことが出来なかったが、7/7 以降は概ね一致した。

N8-N0 区の数値計算は、4/30 の深さ 2-10 cm の減少を除き、5/31 まで概ね表せた。6/3 以降については、7/7 で過大評価した。これは、7/7 の測定値のイネの窒素吸収量が、N4-N0, N8-N0, N16-N0 区でそれぞれ 0.28, 0.33, 1.37 g/m<sup>2</sup> と、N8-N0 区の 6/20-7/7 にかけてのイネの窒素要求量が N4-N0 区とほぼ同じであるため、牛糞堆肥分解量がイネの窒素吸収量を上回ったと考えられる。すなわち、6/20-7/7 にかけての窒素吸収量が増えれば、過大評価も小さくなると考えることができる。また、8/27-9/13 にかけて深さ 2-10 cm で過大評価した。

N16-N0 区の数値計算は、4/30, 5/14 の深さ 2-10 cm の減少を除き、5/31 まで概ね表せた。6/3-6/20 にかけては N4-N0 区同様、増加として表すことが出来なかった。8/27-9/13 にかけて N8-N0 区同様、深さ 2-10 cm で過大評価した。

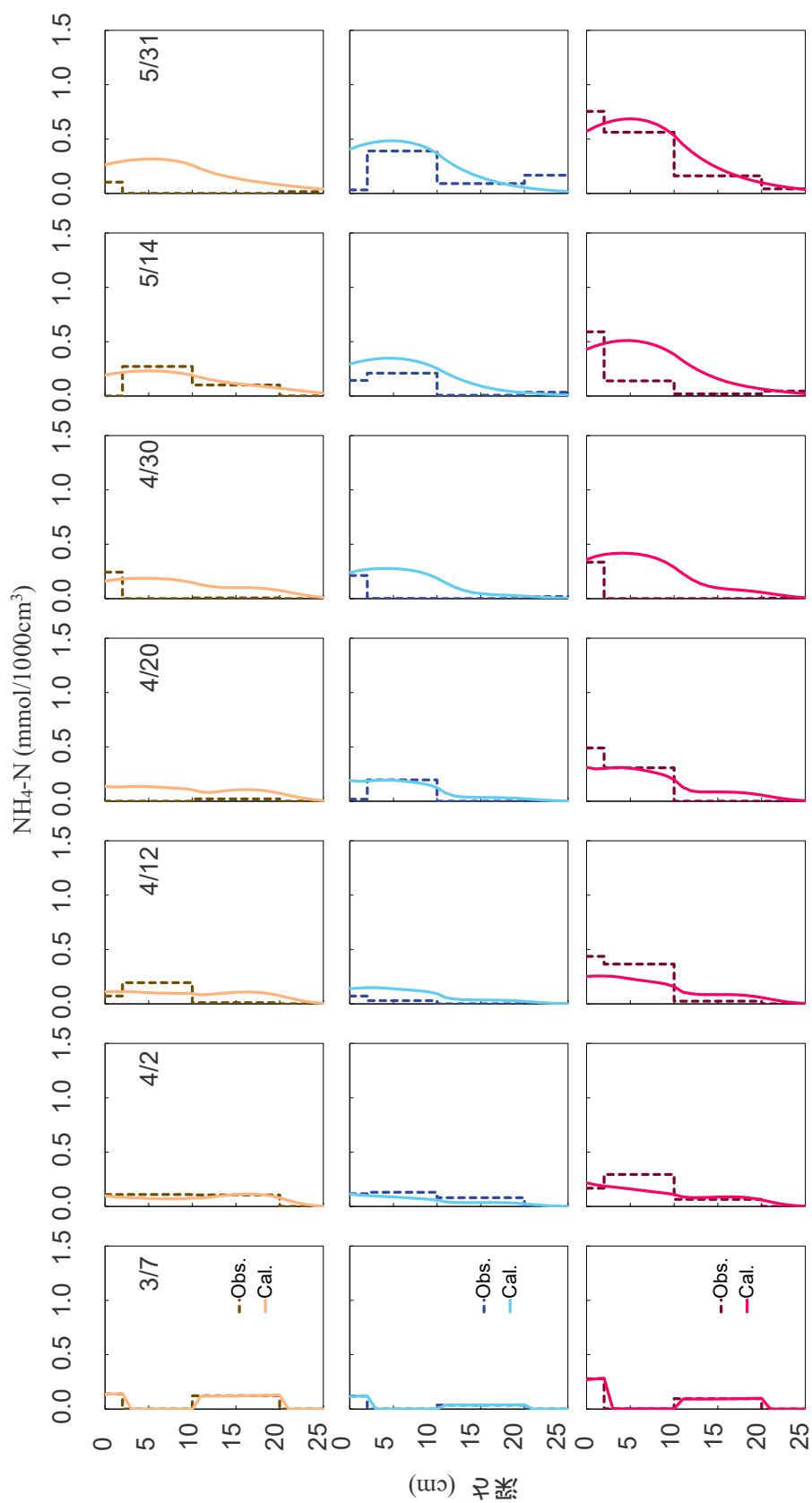


図 4.3.9-a 3月17日～5月31日の $\text{NH}_4\text{-N}$  (上図から N4-N0区, N8-N0区, N16-N0区)

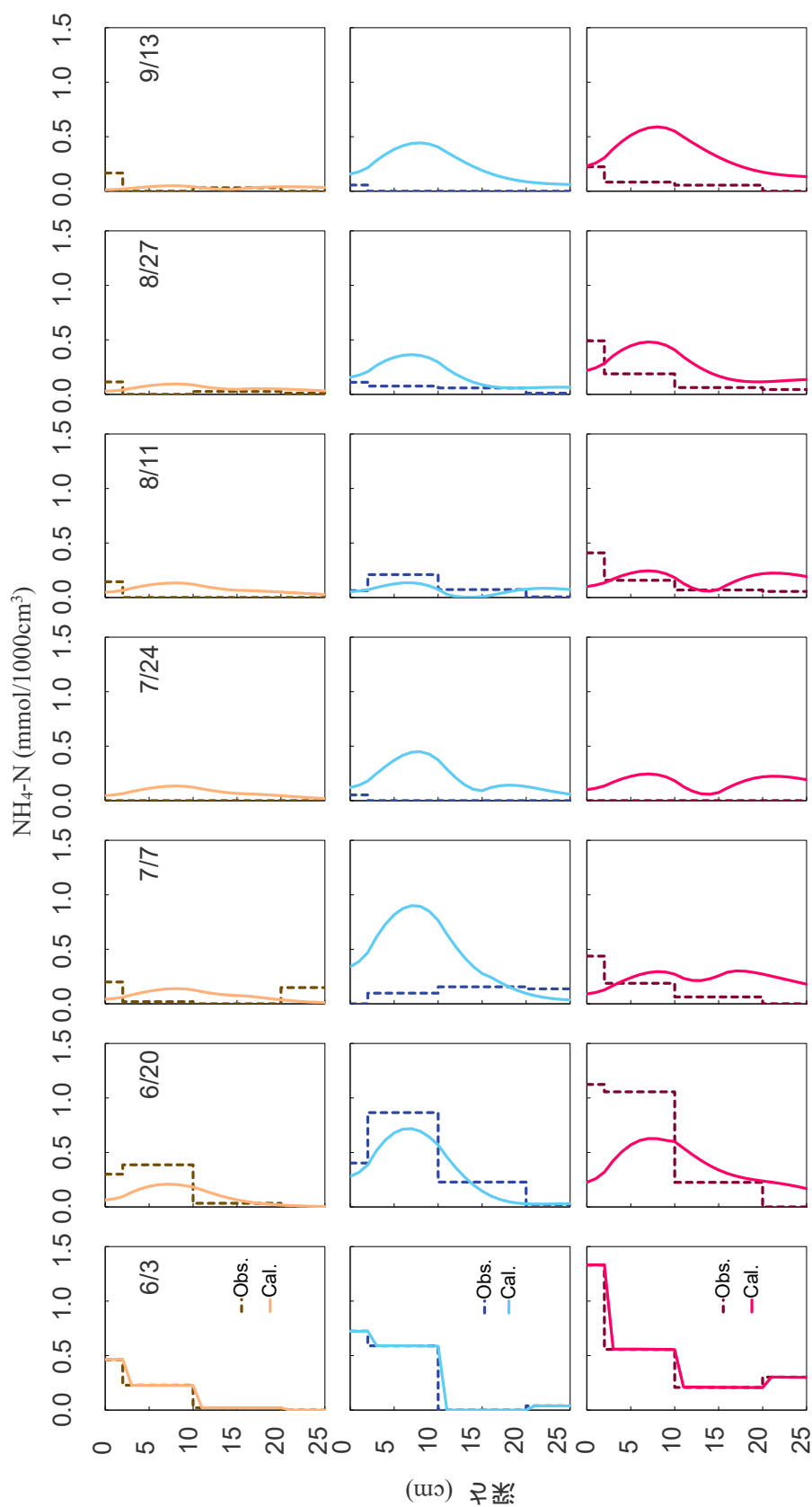


図 4.3.9-b 6 月 3 日～9 月 13 日の  $\text{NH}_4\text{-N}$  (上図から N4-N0 区, N8-N0 区, N16-N0 区)

#### 4-3-3-2 NO<sub>3</sub>-N のプロファイル

施肥量毎の NO<sub>3</sub>-N のプロファイルの測定値と計算値を図 4.3.10 に示す。

数値計算は、区画によらず全深度概ね 0 mmol/1000cm<sup>3</sup> のため、乾燥があった 4/2-4/20 や、移植後の深さ 2-10 cm の増加を表すことが出来なかった。

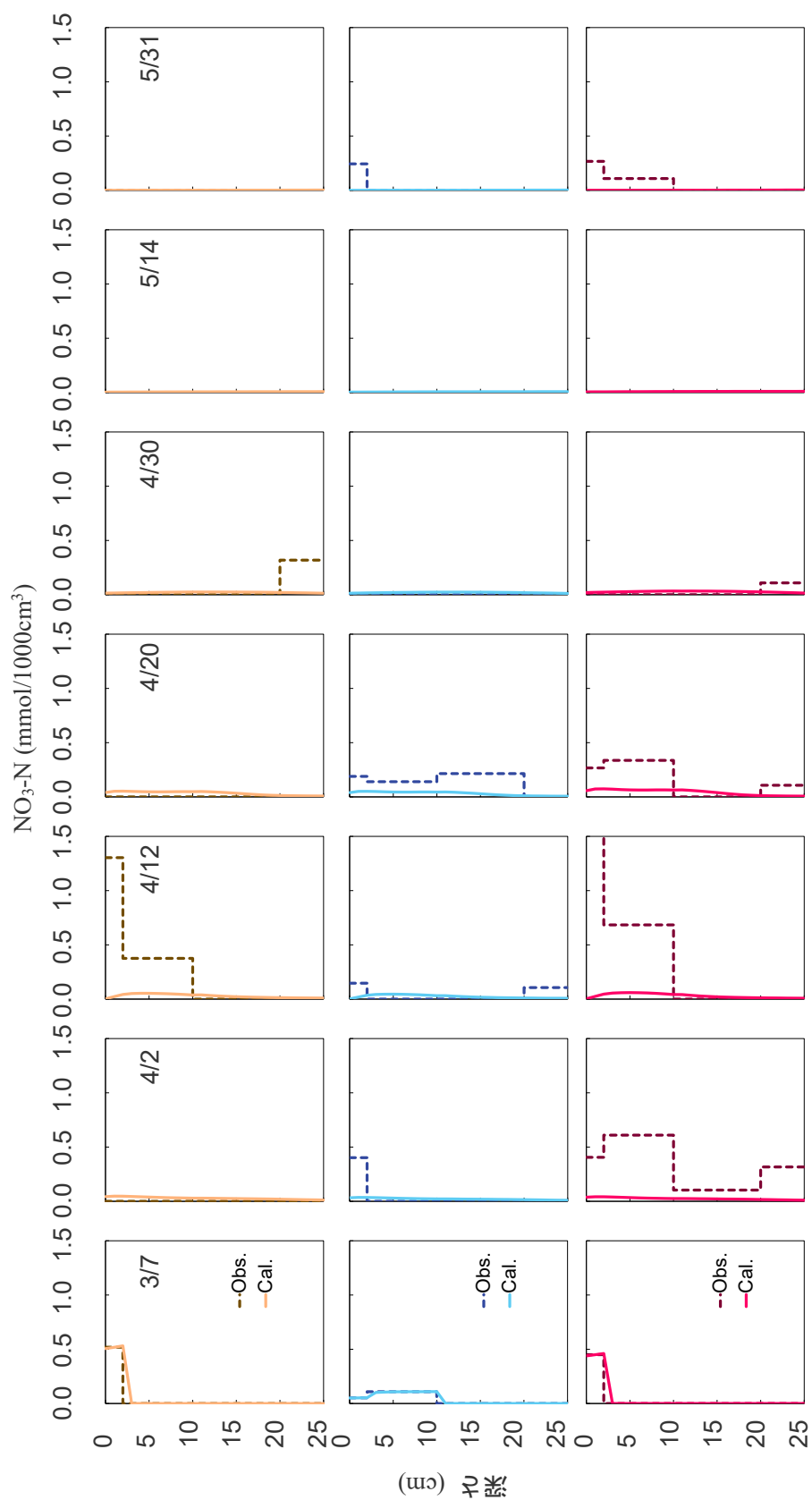


図 4.3.10-a 3月17日～5月31日の $\text{NO}_3\text{-N}$  (上図から N4-N0 区, N8-N0 区, N16-N0 区)

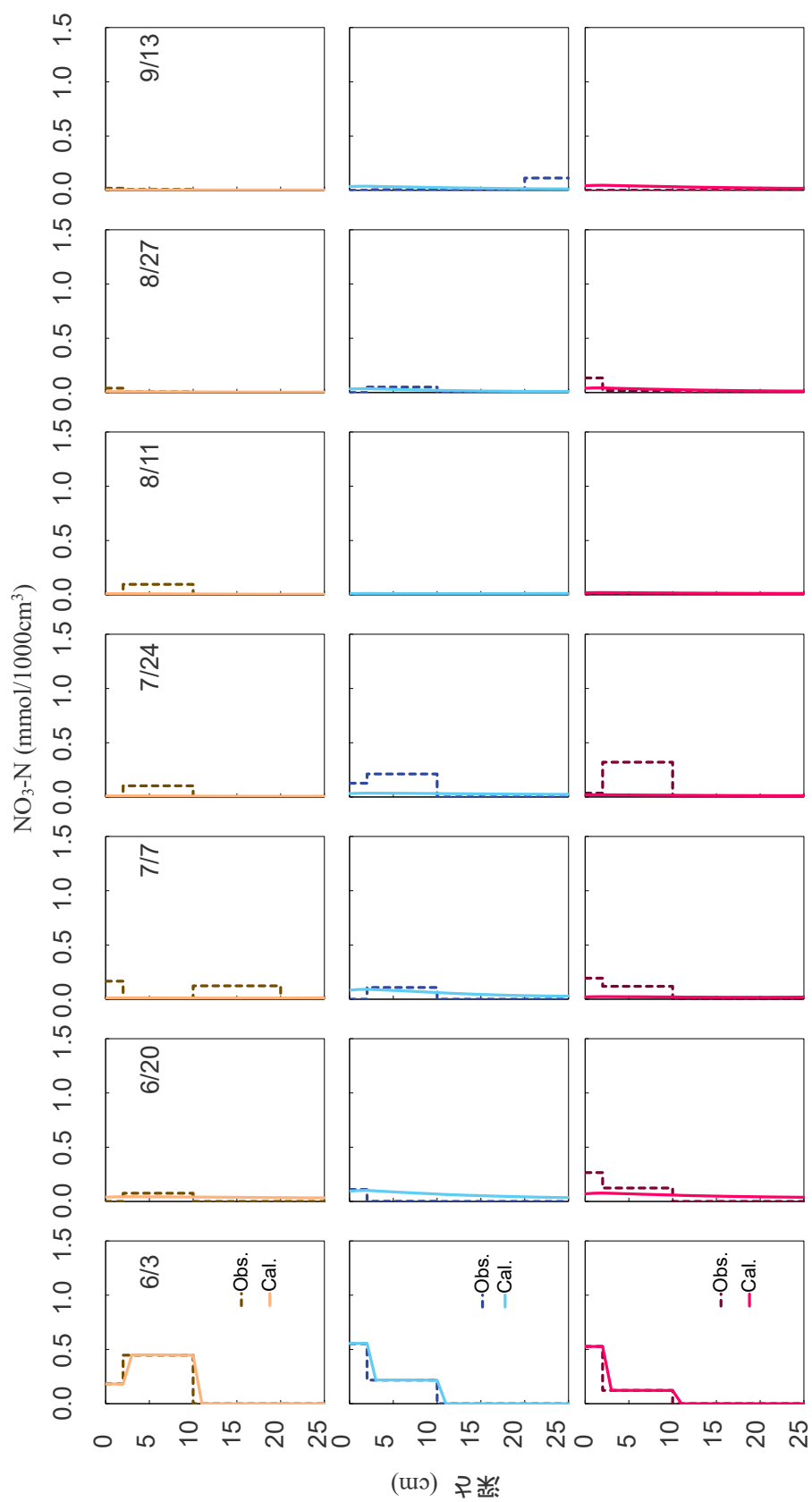


図 4.3.10-b 6月3日～9月13日のNO<sub>3</sub>-N (上図から N4-N0 区, N8-N0 区, N16-N0 区)

#### 4-3-4 窒素収支

深さ 25 cm の窒素収支の測定値と計算値を積み上げ図として図 4.3.11, 3/17-5/31, 6/3-9/13 の各窒素動態と施肥量に対する割合を表 4.3.6 に示す。

N4-N0 区の数値計算は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  は 4/12 まで一致したが、4/20-4/30, 5/31 で過大評価した。6/3 以降については、6/20 で過小評価し 7/24 以降で過大評価した。 $\text{NO}_3\text{-N}$  は 4/12, 4/30 でそれぞれ 0.68, 0.15  $\text{g/m}^2$  過小評価し、7/7-8/11 にかけて過小評価した。イネの窒素吸収量は、9/13 時点での  $\text{NH}_4^+$  受動吸収量  $P_a^{\text{NH}_4^+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  能動吸収量  $A_a^{\text{NH}_4^+}$ ,  $\text{NO}_3^-$  受動吸収量  $P_a^{\text{NO}_3^-}$  はそれぞれ 0.04, 0.78, 0.08  $\text{g/m}^2$  だった。また、下方浸透量, 脱窒量はそれぞれ 0.20, 0.93  $\text{g/m}^2$  だった。

N8-N0 区の数値計算は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  は 3/17-4/20, 6/3-6/20, 8/11 を除き過大評価した。このとき、6/20-7/7 にかけて数値計算の  $\text{NH}_4\text{-N}$  は増加しているが、これは 4-3-3-1 節で示した様に、6/20-7/7 にかけてのイネの窒素要求量が N4-N0 区とほぼ同じだからである。 $\text{NO}_3\text{-N}$  は 4/20, 7/24 で、それぞれ 0.40, 0.17  $\text{g/m}^2$  過小評価した。イネの窒素吸収量は、9/13 時点での  $P_a^{\text{NH}_4^+}$ ,  $A_a^{\text{NH}_4^+}$ ,  $P_a^{\text{NO}_3^-}$  はそれぞれ 0.10, 2.79, 0.24  $\text{g/m}^2$  だった。また、下方浸透量, 脱窒量はそれぞれ 0.30, 1.44  $\text{g/m}^2$  だった。

N16-N0 区の数値計算は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  は 4/20 まで概ね一致したが、4/30-5/14 にかけて過大評価した。6/3 以降については、6/20 で過小評価し 7/11-7/24, 8/27 以降で過大評価した。 $\text{NO}_3\text{-N}$  は 4/2, 4/12, 4/20, 7/24 で、それぞれ 1.08, 1.50, 0.38, 0.22  $\text{g/m}^2$  過大評価した。イネの窒素吸収量は、9/13 時点での  $P_a^{\text{NH}_4^+}$ ,  $A_a^{\text{NH}_4^+}$ ,  $P_a^{\text{NO}_3^-}$  はそれぞれ 0.05, 3.03, 0.18  $\text{g/m}^2$  だった。また、下方浸透量, 脱窒量はそれぞれ 0.57, 1.25  $\text{g/m}^2$  だった。

総括して、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の数値計算は湛水期間のうち裸地の 4/30-5/31, 移植 6/3-分げつ活性期 7/7, 出穂期 8/11 以降は表せたが、4/2-4/20 の乾燥を伴う期間, 7/7-7/24 の湛水を維持できなかった期間で過小評価した。本研究では、最大の硝化速度  $k_{\text{nit}}(25, 0.30) = 0.16/\text{d}$  で与えており、これは無機化速度  $k_{\text{min}}$  に比べ比較的大きい。そのため硝化の温度・水分依存に関するパラメータの検討が必要だと考えられる。 $\text{NH}_4\text{-N}$  の数値計算は、施肥 3/17-4/20, イネの窒素吸収量が概ね最大になる 8/11 は表せたが、湛水・裸地の 4/30-5/31 や 8/11 を除く栽培期間で過大評価する傾向がみられた。特に、8/11 以降は計算値が測定値を過大評価したが、測定値は 8/11 以降は緩やかに増加していること、イネの窒素吸収増加量が 0  $\text{g/m}^2$  とみなせることから、施肥した牛糞堆肥の多くは 8/11 で分解した可能性がある。そのため、数値計算でも 8/11 までに多くの牛糞堆肥を分解できるよう無機化に関するパラメータの検討が必要であると考えられる。

無機化の温度依存性は、N4-N0, N8-N0, N16-N0 区で、3/17-5/31 はそれぞれ  $B = 0.18, 0.16, 0.15/^{\circ}\text{C}$ , 6/3-9/13 はそれぞれ  $B = 0.16, 0.19, 0.19/^{\circ}\text{C}$  となった。また、Arrhenius の式 (式 2.3.17) で近似した結果、 $B = 0.15, 0.16, 0.18, 0.19/^{\circ}\text{C}$  で  $E_a = 102222, 109078, 122794, 131370 \text{ J/mol}$  で近似することが出来た。3/17-5/31, 6/3-9/13 での  $k_{\text{min}}$  と適用された地温  $T_{\text{soil}}$  の範囲との関係を図 4.3.12 に示す。



また、2 期間でそれぞれ違う  $B$  を与える必要があったことから、永源モデルの検討が必要であることが分かった。例えば、本研究では  $T = 0^{\circ}\text{C}$  で  $k_{\min} = 0.0001 / \text{d}$  とした指数関数を与えたが、この値を大きく、 $B$  を小さくすれば、 $1^{\circ}\text{C}$  上昇したときの  $k_{\min}$  の増加率が小さくなるため、 $T = 0^{\circ}\text{C}$  での  $k_{\min}$  の検討が必要であると考えられる（図 4.3.13）。

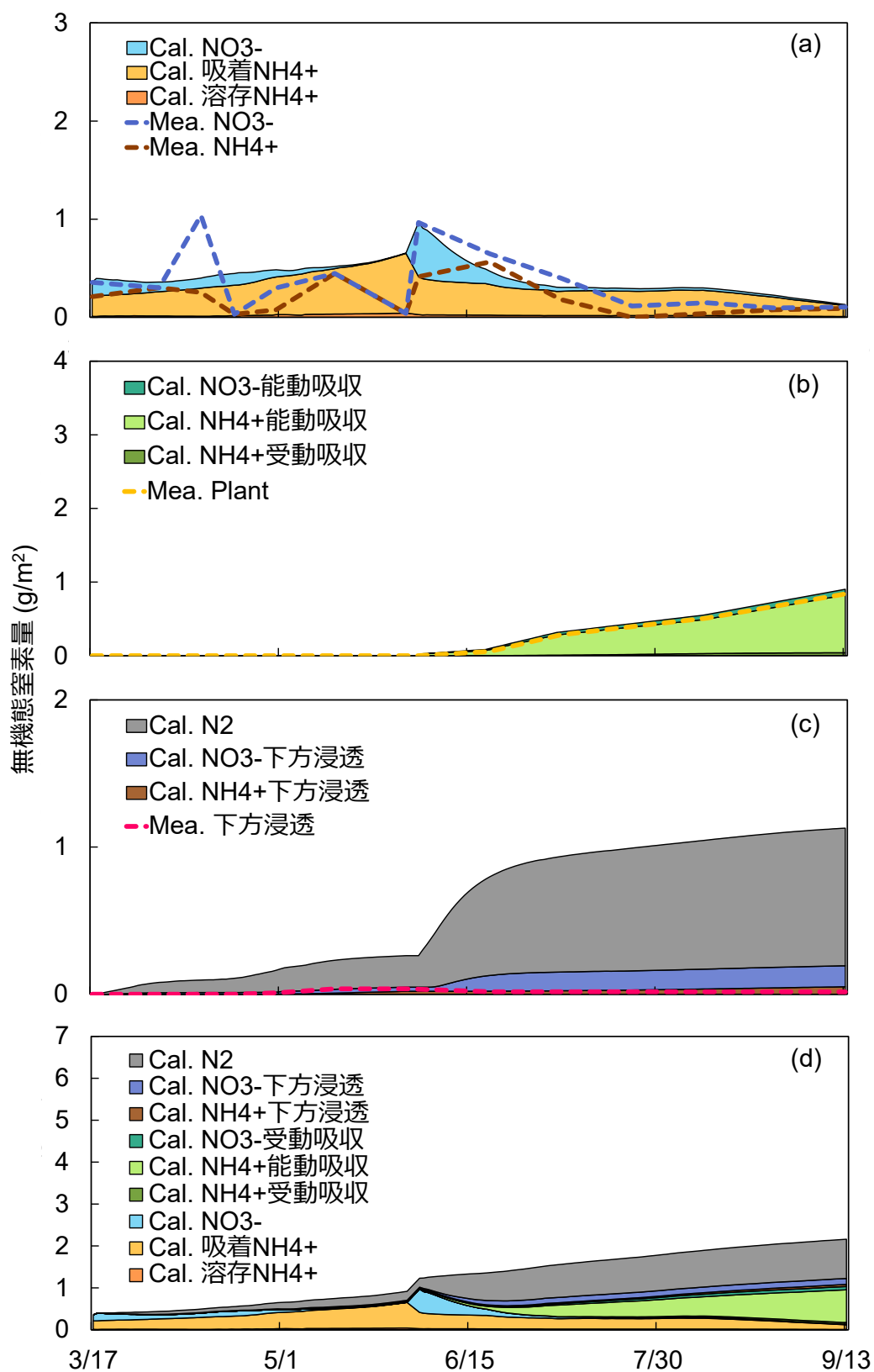


図 4.3.11-a N4-N0 区の窒素収支

(a : 土中窒素量, b : 窒素吸収量, c : 脱窒と下方浸透量, d : 数値計算の窒素収支)

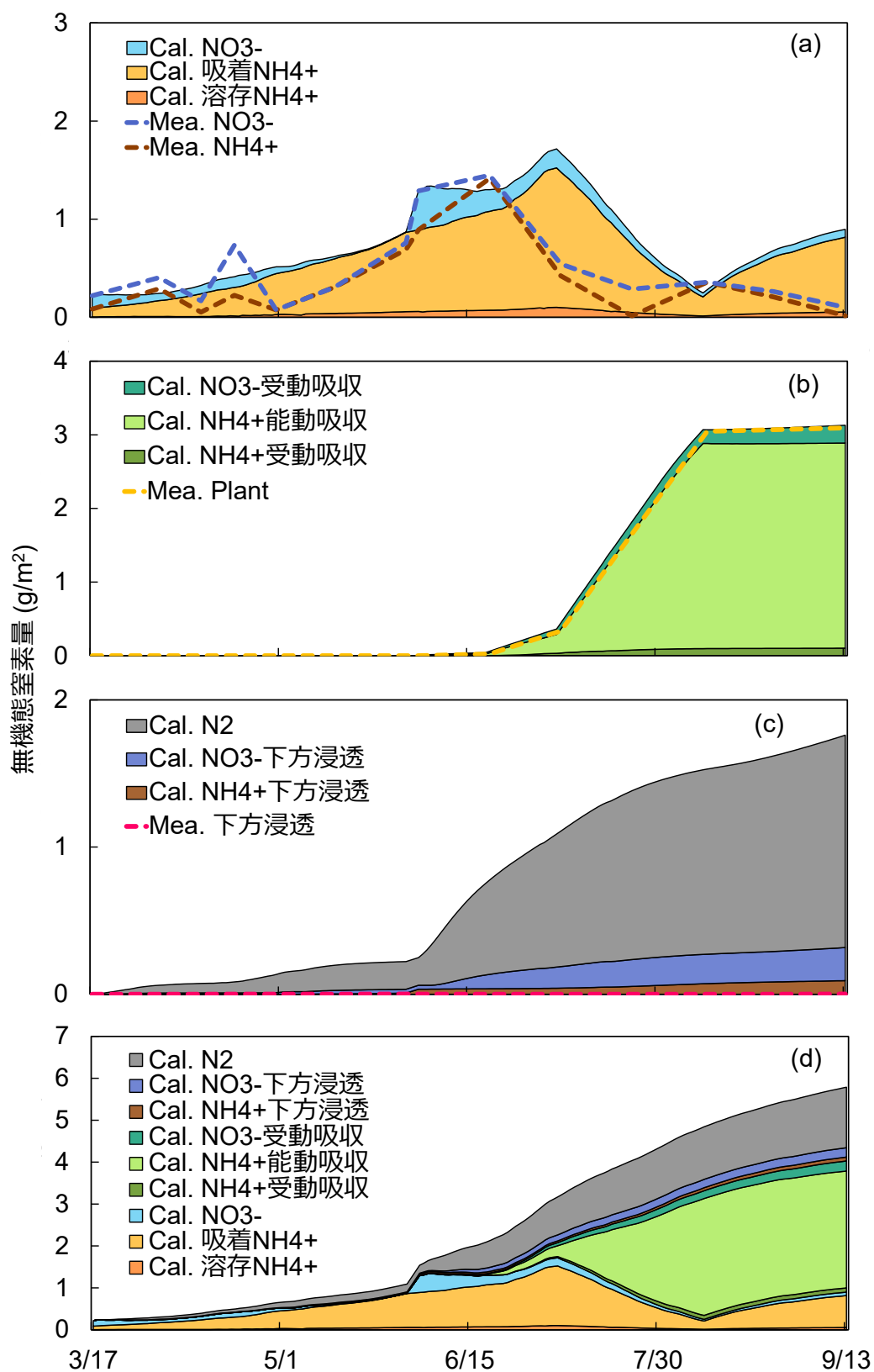


図 4.3.11-b N8-N0 区の窒素収支

(a : 土中窒素量, b : 窒素吸収量, c : 脱窒と下方浸透量, d : 数値計算の窒素収支)

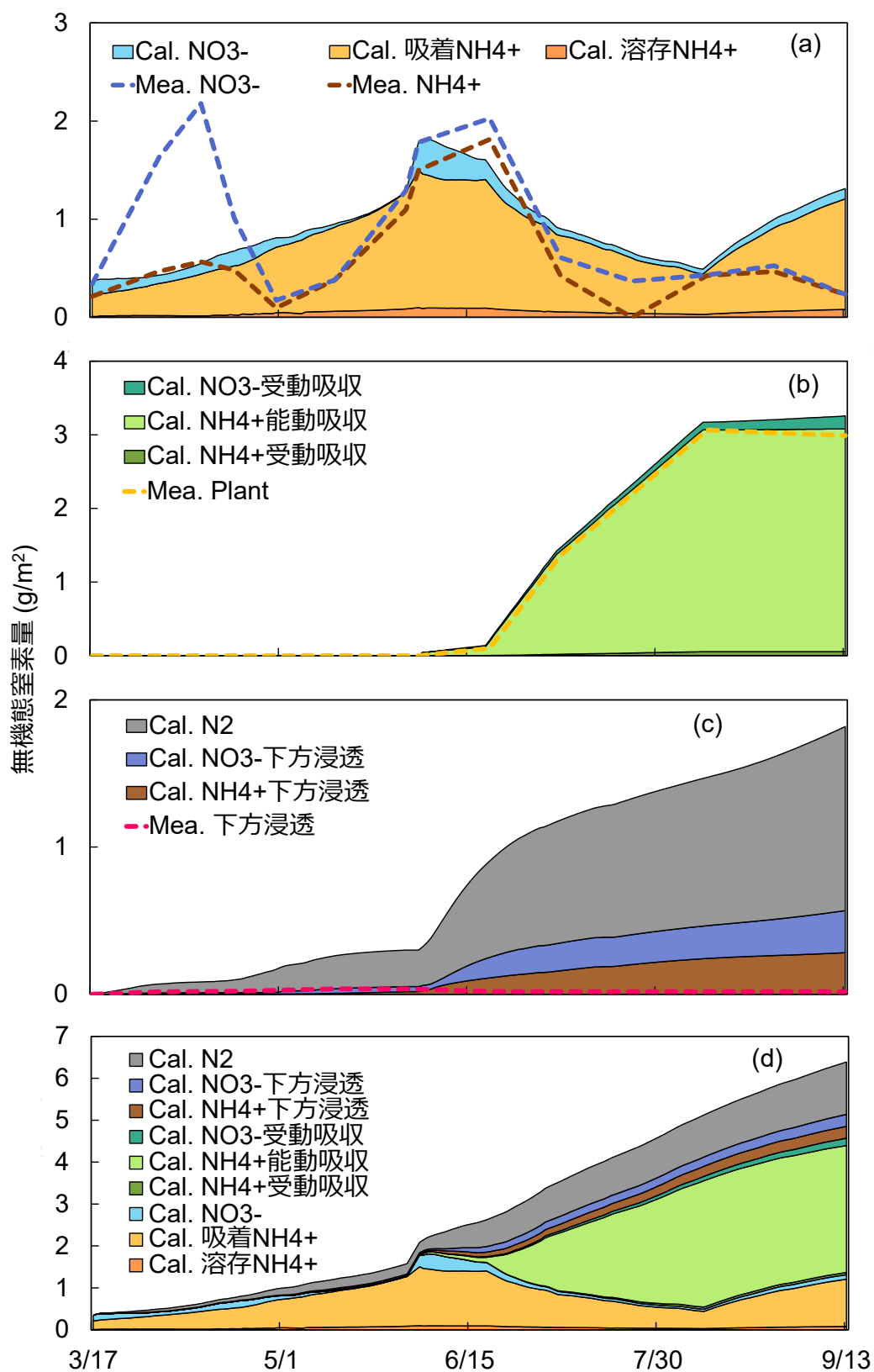


図 4.3.11-c N16-N0 区の窒素収支

(a : 土中窒素量, b : 窒素吸収量, c : 脱窒と下方浸透量, d : 数値計算の窒素収支)

表 4.3.6 3/17-5/31, 6/3-9/13 の各窒素動態と施肥量に対する割合

	g/m <sup>2</sup>	無機化量	土中NH <sub>4</sub> -N	土中NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 下方浸透量	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 下方浸透量	脱窒量	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 受動吸収量	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 能動吸収量	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 受動吸収量
N4-N0区	3/17-5/31	0.56	0.44	-0.14	0.02	0.03	0.21			
	6/3-9/13	0.93	-0.30	-0.54	0.03	0.12	0.72	0.04	0.78	0.08
N8-N0区	3/17-5/31	0.87	0.77	-0.13	0.01	0.03	0.19			
	6/3-9/13	4.25	-0.07	-0.32	0.06	0.20	1.25	0.10	2.79	0.24
N16-N0区	3/17-5/31	1.24	1.06	-0.12	0.02	0.03	0.25			
	6/3-9/13	4.30	-0.30	-0.28	0.27	0.25	1.00	0.05	3.03	0.18
	%	無機化量	土中NH <sub>4</sub> -N	土中NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 下方浸透量	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 下方浸透量	脱窒量	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 受動吸収量	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 能動吸収量	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 受動吸収量
N4-N0区	3/17-5/31	14.00	11.00	-3.50	0.50	0.75	5.25			
	6/3-9/13	23.25	-7.50	-13.50	0.75	3.00	18.00	1.00	19.50	2.00
N8-N0区	3/17-5/31	10.88	9.63	-1.63	0.13	0.38	2.38			
	6/3-9/13	53.13	-0.88	4.00	0.75	2.50	15.63	1.25	34.88	3.00
N16-N0区	3/17-5/31	7.75	6.63	-0.75	0.13	0.19	1.56			
	6/3-9/13	26.88	-1.88	-1.75	1.69	1.56	6.25	0.31	18.94	1.13

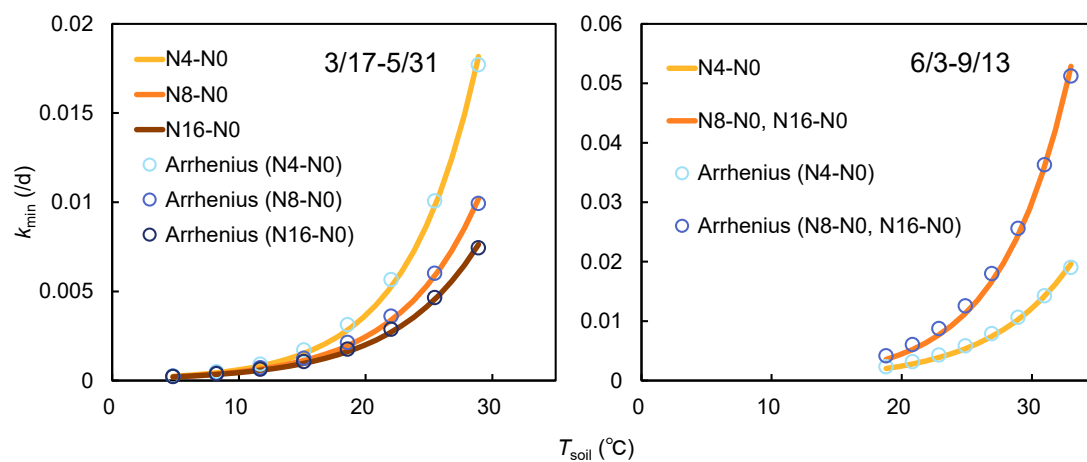


図 4.3.12-a 適用した  $k_{\min}$  (永源モデル式 4.3.2) と Arrhenius 式 (式 2.3.17)  
(左図 : 3/17-5/31 右図 : 6/3-9/13)

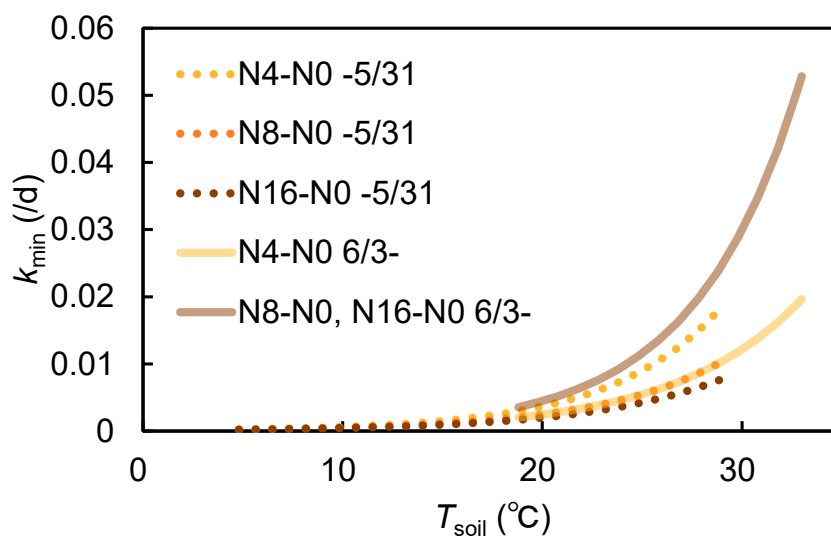


図 4.3.12-b 適用した  $k_{\min}$  (永源モデル式 4.3.2) と適用した地温範囲

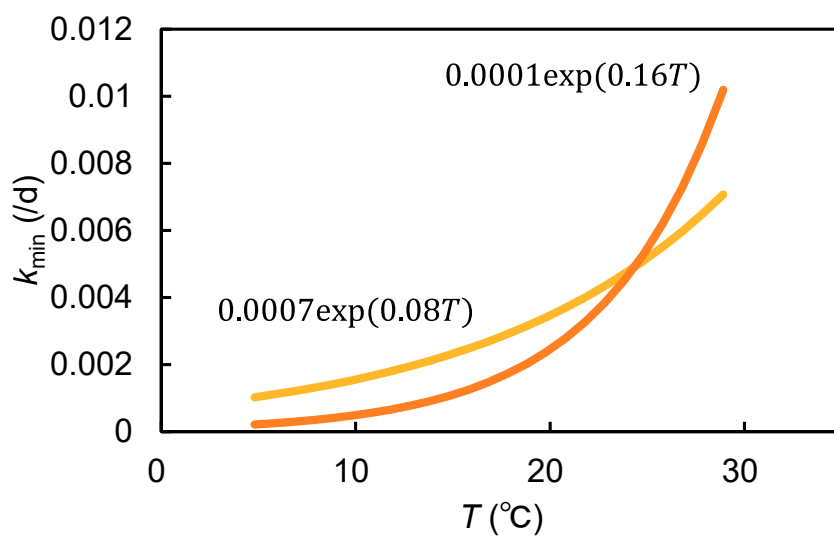


図 4.3.13 永源モデル式 4.3.2 の改善例

#### 4-4 まとめ

ここでは、牛糞堆肥由来の窒素の数値計算での結果についてまとめる。

数値計算では、計算期間を 3/17-5/31 の代かきまで、6/3-9/13 の栽培期間と 2 期間にわけて計算した。イネの窒素吸収量は測定値に合うように、測定値と  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の受動吸収の差を  $\text{NH}_4\text{-N}$  の能動吸収として与えた。無機化、硝化、脱窒を 1 次分解反応式で表し、それぞれに温度・水分依存性を与えた。そして、無機化の温度依存性は永源（2022）と同じく指数関数で与えた。

$\text{NH}_4\text{-N}$  のプロファイルについて、N4-N0 区の数値計算は、5/14 まで概ね表せた。5/31 は過大評価し、7/7 以降は概ね一致した。5/31 の過大評価は、N8-N0、N16-N0 区の測定値は 5/14-5/31 にかけて深さ 0-10 cm で増加しているため、N4-N0 区も他 2 区同様測定値は増加したと考えれば、概ね表せたといえる。N8-N0 区の数値計算は、4/30 の深さ 2-10 cm の減少を除き、5/31 まで概ね表せた。6/3 以降については、7/7、8/27-9/13 の深さ 2-10 cm で過大評価したが、それ以外は概ね表せた。7/7 の過大評価については、測定値のイネの窒素吸収量が、N4-N0 とほぼ同じたため、有機物分解量 > イネの窒素吸収量になったと考えられる。そのため、7/7 のイネの窒素吸収量が N4-N0 区より大きければ、7/7 も一致すると考えられる。N16-N0 区の数値計算は、4/30、5/14 の深さ 2-10 cm の減少を除き、5/31 まで概ね表せた。6/3 以降については、7/7-8/11 で概ね表せたが、6/3-6/20 にかけては N4-N0 区同様増加として表すことが出来ず、8/27-9/13 にかけて N8-N0 区同様深さ 2-10 cm で過大評価した。総じて、代かきまでの 5/31 は測定値をよく表した。移植以降は、6/3-6/20、8/27-9/13 を除いてよく表した。

$\text{NO}_3\text{-N}$  のプロファイルについて、0 mmol/1000cm<sup>3</sup> とみなせる日、深度では表せたが、非湛水期間の乾燥時の増加や、移植以降の深さ 2-10 cm の増加を表すことが出来なかった。

深さ 25 cm の窒素収支は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  は施肥 3/17-4/20、イネの窒素吸収量が概ね最大になる 8/11 は表せたが、湛水・裸地の 4/30-5/31 や 8/11 を除く栽培期間で過大評価した。 $\text{NO}_3\text{-N}$  は、湛水期間のうち裸地の 4/30-5/31、移植 6/3-分げつ活性期 7/7、出穂期 8/11 以降は表せたが、4/2-4/20 の乾燥を伴う期間、7/7-7/24 の湛水を維持できなかった期間で過小評価した。最大の硝化速度が 0.16 /d と比較的大きいことから、 $\text{NO}_3\text{-N}$  を再現するには硝化の温度・水分依存性の検討が必要だと考えた。また、8/11 以降の  $\text{NH}_4\text{-N}$  測定値がわずかしこ増加していないことから、8/11 時点で多くの牛糞堆肥が分解した可能性があり、数値計算でも多くの牛糞堆肥を分解させる必要があると考えた。しかし、 $\text{NO}_3\text{-N}$  を再現することが出来れば  $\text{NO}_3\text{-N}$  が増加、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が減少するため、無機化のパラメータの検討よりもまずは硝化のパラメータの検討が優先的に必要だと考えられる。

3/17-5/31 における牛糞堆肥施肥量に対する各窒素動態の割合は、無機化量が 7.75-14.00 % ということが分かった。6/3-9/13 においては、N4-N0、N16-N0 区で約 25 % に対し、N8-N0 区で約 50 % と倍近く違った。各パラメータの検討が必要のため、この結果が正しいとは限らない。しかし、牛糞堆肥施肥量に対するイネの窒素吸収量は、N8-N0 区で約 40 % に対し、



N4-N0 区, N16-N0 区で約 20 %と倍近く違っていた。そのため、移植時点の牛糞堆肥残存割合や硝化, 脱窒のパラメータが施肥量によらず同じ場合、イネの窒素吸収量を満たすために N8-N0 区だけ無機化率を高くする必要がある。よって、土壌微生物の活発度合いが施肥量によって異なる可能性があると考えられる。また、6/3-9/13 における脱窒, 下方浸透の割合は、N16-N0 区を除き約 20 %, 約 4 %となった。Bi et al., (2023) は、尿素を施用した水田で、尿素の 36-45 %が脱窒し、0.86-2.38 %が下方浸透するとしている。Zhou et al., (2012) は、中干しがある水田では、施肥量の 38.9 %が脱窒するとしている。しかし、これらの研究は基肥に化成肥料を用いているため、有機肥料と化成肥料による無機化速度の違いが影響している可能性がある。そのため、有機肥料と化成肥料での脱窒量の違いについて検討する必要がある。

数値計算をより精度よく行うためには、長い年月をかけて土中の窒素変化量やイネの窒素吸収量を継続して測定し、窒素動態をより明らかにする必要がある。また、圃場内の雑草, 藻類による窒素吸収も考慮する必要があると考えられる。

## 5章 おわりに

本研究では、牛糞堆肥を有機肥料として施用した水田土中の窒素動態を明らかにすることを目的とした。3章の圃場実験では、牛糞堆肥由来の  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の経時変化量や、施肥量に対するイネの窒素吸収増加量を測定した。4章の数値計算では、圃場の水分・熱移動の数値計算を行った後、無機化、硝化、脱窒に温度・水分依存性を与えることで測定値を再現できるか検証し、牛糞堆肥由来の窒素の脱窒量、下方浸透量などの窒素動態を求めた。

圃場実験では、施用した牛糞堆肥由来のうち、イネに吸収された窒素量は N4-N0, N8-N0, N16-N0 区で 20, 38, 19% がイネに吸収されたことが分かった。収量は、N4 区は N0 区より小さく、N8, N16 区は大きかったが、N8, N16 区の違いは見られなかった。このことから、N8 区で最も施肥効率がよかったことがわかった。土中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  のプロファイルは、主に深さ 0-10 cm で増減が目立ち、有機物分解は深さ 0-10 cm で活発に行われていると考えられた。また、この傾向は牛糞堆肥施肥量が多いほど大きかった。土中の  $\text{NO}_3\text{-N}$  のプロファイルは、4/12 の無降水期間で全区画深さ 0-2 cm でみられた。4/20 では N8, N16 区の深さ 10 cm 以深でみられ、4/30 では N4, N16 の深さ 25 cm でみられたことから、 $\text{NO}_3\text{-N}$  が下方に流れたと考えられた。そして、牛糞堆肥由来の無機態窒素は、移植 6/3 では N4-N0, N8-N0, N16-N0 区でそれぞれ 1.0, 1.3, 1.8 g/m<sup>2</sup> と大きく増加し、このとき  $\text{NO}_3\text{-N}$  の増加が顕著だったことがわかった。移植以降は緩やかに減少し、イネの窒素吸収がとまった出穂期 8/11 以降はわずかしこ増加しなかったことがわかった。

数値計算では、計算期間を 3/17-5/31 の代かきまで、6/3-9/13 の栽培期間と 2 期間にわけて計算し、イネの窒素吸収量は測定値に合うように  $\text{NH}_4\text{-N}$  の能動吸収として与えた。無機化、硝化、脱窒を 1 次分解反応式で表すとともに、温度・水分依存性を与えた。 $\text{NH}_4\text{-N}$  のプロファイルは、代かきまでの -5/31 は測定値をよく表した。移植以降は、6/3-6/20, 8/27-9/13 を除いてよく表した。 $\text{NO}_3\text{-N}$  のプロファイルは、0 mmol/1000cm<sup>3</sup> とみなせる日、深度では表せたが、非湛水期間の乾燥時の増加や、移植以降の深さ 2-10 cm の増加を表すことが出来なかった。深さ 25 cm の窒素収支のうち、 $\text{NH}_4\text{-N}$  で施肥 3/17-4/20, イネの窒素吸収量が概ね最大になる 8/11 は表せたが、湛水・裸地の 4/30-5/31 や 8/11 を除く栽培期間で過大評価した。 $\text{NO}_3\text{-N}$  は湛水期間のうち裸地の 4/30-5/31, 移植 6/3-分げつ活性期 7/7, 出穂期 8/11 以降は表せたが、4/2-4/20 の乾燥を伴う期間、7/7-7/24 の湛水を維持できなかった期間で過小評価した。そして、本研究で与えた最大の硝化速度が 0.16 /d と比較的大きいこと、8/11 時点で多くの牛糞堆肥が分解した可能性があるとしたことから、無機化のパラメータの検討よりもまずは硝化のパラメータの検討が優先的に必要だと考えた。

また、本研究で与えたパラメータでは、3/17-5/31 にかけて牛糞堆肥施肥量に対する無機化量が 7.75-14.00% ということ、栽培期間の 6/3-9/13 は、N4-N0, N16-N0 区で約 25%, N8-N0 区で約 50% と倍近く違うことが分かった。そのため、最適な施肥量をすることで多くの牛糞堆肥が分解し、逆に最適な施肥量が出来ない場合は牛糞堆肥の分解量が少ない可能性があると考えられる。6/3-9/13 における牛糞堆肥施肥量に対する脱窒、下方浸透の割合は、

N16-N0 区を除き約 20 %, 約 4 %となった。脱窒量は先行研究より低い割合となったが、これらの研究は基肥に化成肥料を用いているため、無機化速度の違いから有機肥料の施用は化成肥料に比べ脱窒量を抑える可能性があると考えられる。これを検証するためには、有機肥料と化成肥料での脱窒量の違いについて検討する必要があるといえる。

## 参考文献

1. Belmans, C., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., (1983): Simulation model of the water balance of a cropped soil:SWATRE, *Journal of Hydrology*, 63(3), 271-286.
2. Bi, S., Luo, X., Zhang, C., Li, P., Yu, C., Liu, Z., Peng, X., (2023) Fate of fertilizer nitrogen and residual nitrogen in paddy soil in Northeast China, *Journal of Integrative Agriculture*, 22(11), 3535-3548
3. Bremer, J.M., Shaw, K., (1958): Denitrification in soil. II. Factors affecting denitrification, *The journal of Agricultural Science*, 51(1), 39-52
4. Chen, K., Yu, S., Ma, T., Ding, J., He, P., Li, Y., Dai, Y., Zeng, G (2022): Modeling the Water and Nitrogen Management Practices in Paddy Fields with HYDRUS-1D, *Agriculture*, 12(7), 924
5. Chung, S.O., Horton, R., (1987): Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resources Research*, 23, 2175-2186
6. de Marsily, G., (1986): *Quantitative Hydrogeology*, Academic Press, London
7. Fageria, N.K., (2007): Yield Physiology of Rice, *Journal of Plant Nutrition* ,30(6), 843–879
8. Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., (1978): *Simulation of field water use and crop yield*, Centre for Agricultural Publishing and Documentation
9. Holcomb, J.C., Sullivan, D.M., Horneck, D.A., Clough, G.H., (2011): Effect of irrigation rate on ammonia volatilization, *Soil Science Society of America Journal*, 75(6), 2341-2347
10. Johnsson, H., Bergström, L., Jansson, P-E., and Paustian, K., (1987): Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 18, 333-356
11. Jungk, A.O., (1991): Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface, In: Waisel, Y., Eshel, A., Kafafi, U. (Eds.), *Plant roots, The hidden half*, Marcel Dekker Inc., 455-481
12. Jury, W.A., Horton, R., (2006): 土壌物理学—土中の水・熱・ガス・化学物質移動の基礎と応用—（取出伸夫 監訳:井上光弘, 長裕幸, 西村拓, 諸泉利嗣, 渡辺晋生訳）, 築地書館
13. Li, Y., Šimůnek, J., Zhang, Z., Jing, L., Ni, L., (2015): Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D, *Agricultural Water Management*, 148, 213–222.
14. Matsunaka Teruo, Sentoku Asuka, (2002): Impact ecaluation among factors affecting ammonia emmision from surface applied cattle slurry
15. Phogat, V., Yadav, A.K., Malik, R.S., Kumar, S., Cox, J., (2010): Simulation of salt and water movement and estimation of water productivity of rice crop irrigated with saline water, *Paddy Water Environ.* 8(4), 333–346.
16. Ray R.Weil, Nyle C.Brady, (2017): *The nature and properties of soils*, 15th edition, Pearson, 546-555, 611-613

17. Ritchie, Joe T., (1972): Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover, *Water Resources Research*, 8(5), 1204-1213
18. Rochette, P., Angers, D.A., Chantigny, M.H., Gasser, M.O., MacDonald, J.D., Pelster, D.E., Bertrand, N., (2013):  $\text{NH}_3$  volatilization, soil concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates, *Canadian Journal of Soil Science*, 93(2), 261-268
19. Sierra, C.A., Trumbore, S.E., Davidson, E.A., Vicca, S., Janssens, I., (2015): Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(1), 335-356
20. Šimůnek, J., Hopmans, J.W., (2009): Modeling compensated root water and nutrient uptake, *Ecological Modelling*, 220, 505-521
21. Singh, R., van Dam, J.C., Jhorar, R.K., (2003): Water and salt balances at farmer fields. In: van Dam, J.C., Malik, R.S. (Eds.), *Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India.*, WATPRO final
22. van Genuchten, M.Th., (1987): A numerical model for water and solute movement in and below the root zone, Unpublished Research Report, U.S. Salinity Laboratory
23. van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898
24. Zhou, S., Sakiyama, Y., Riya, S., Song, X., Terada, A., Hosomi, M., (2012): Assessing nitrification and denitrification in a paddy soil with different water dynamics and applied liquid cattle waste using  $^{15}\text{N}$  isotopic technique, *Science of The Total Environment*, 430(15), 93-100
25. 石黒宗秀 (2018): 土壌における溶質の吸着移動現象の基礎理論 I. いろいろな吸着式, *土壌の物理性*, 140, 23-28
26. 石黒宗秀 (2019): 土壌における溶質の吸着移動現象の基礎理論 II. ラングミュアの吸着式, *土壌の物理性*, 141, 85-90
27. 石橋英二, 藤原(芝)宏子, 鷲尾建紀, 大家理哉 (2014): 堆肥等有機質資材からの窒素無機化率の推定における反応速度論的手法の新たな解析方法の提案, *土壌肥料学会誌*, 85(4), 362-368
28. 永源奨 (2022): 冬季に施用した米ぬか量が異なる水田土中の窒素動態について, 三重大大学修士論文
29. 大西一平 (2018): ポット栽培実験における蒸発速度の日変化に基づく水ストレス応答関数の決定, 三重大大学修士論文
30. 大橋祥範, 日置雅之 2, 糟谷真宏 (2017): 愛知県内で流通する 12 種の有機質肥料からの窒素無機化量の推定, *愛知県農業総合試験場研究報告*, 49, 1-8
31. 岡田華保 (2021): 水分移動を伴う黒ボク土中の有機物の無機化と硝化, 三重大大学修士論文

32. 木村美咲 (2017): 異なる有機物を施用した土中における窒素の態の変化, 三重大学卒業論文
33. 古賀伸久, 新美洋, 井原啓貴, 山口典子, 山根剛, 草場敬 (2019): 各種有機質資材における酸性デタージェント可溶有機態窒素含量 -資材ごとの特徴およびC/N比との関係, 90(2), 107-115
34. 古賀伸久, 仁科一哉, 望月賢太, 小林創平, 新美洋, 井原啓貴, 山口典子, 山根剛, 草場敬 (2023): 酸性デタージェント可溶有機態窒素含量を導入した有機質資材窒素無機化予測モデルの構築, 土壤肥料学会誌, 94(2), 106-114
35. 小柳渉, 平尾賢一, 棚橋寿彦 (2016): AD 可溶窒素とアンモニア態窒素を指標とした有機質資材の窒素肥効評価, 土肥要旨集, 62, 121
36. 小柳渉, (2017): AD 可溶窒素とアンモニア態窒素を指標とした有機質資材の窒素肥効評価 第2報 適用性の拡大と即効性窒素推定について, 土肥要旨集, 63, 132
37. 今野和夫, 金野隆光, 菊池晃二 (1996): 各種緑肥を施与した畑土壌の窒素無機化特性値, 土壤肥料学会誌, 67(4), 422-424
38. 金野隆光 (1979): 土壌の生物活性をはかる, 日本農芸化学, 17(9), 574-579
39. 斎藤広隆, 坂井勝, Šimůnek, J., 取出伸夫 (2006): 不飽和土中の水分移動モデルにおける境界条件, 土壌の物理性, 104, 63-73.
40. 進藤勇人, 金田吉弘, 加藤雅也, 坂本喜七, 佐藤寛子, 富樫祐悦, 藤原久康 (2002): 家畜ふんペレット堆肥の機械散布及び窒素無機化特性, 東北農業研究, 55, 41-42
41. 末吉孝行, 藤富慎一, 平野稔彦, 荒木雅登 (2004): 福岡県内産豚ふん堆肥の成分特性およびリーフレタス栽培 における施用方法, 福岡県農業総合試験場研究報告, 23, 42-47
42. 杉原進, 金野隆光, 石井和夫, (1986): 土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法, 農業環境技術研究所報告, 1, 127-166
43. 苗木信彦, 谷昌幸, 中津智史 (2007): 黒ボク土からのアンモニア揮散に及ぼす土壌pH・温度・施用窒素形態の影響, 土壤肥料学会誌, 78(3), 309-312
44. 中西真紀 (2017): 浸透過程にある不飽和土中の窒素の硝化と挙動に関する研究, 三重大学修士論文
45. 中村公人, 取手伸夫 (2007): 形態変化を1次反応式により考慮した土中の窒素移動モデル, 土壌の物理性, 105, 83-97
46. 農林水産省 (2022): 食生活・ライフスタイル調査～令和3年度～ 調査報告書
47. 農林水産省 (2021): みどりの食料システム戦略～食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現～
48. 松岡健介 (2018): 水田土中における嫌氣的有機物分解を考慮した窒素・炭素成分の反応移動モデルの構築, 三重大学修士論文
49. 松中照夫 (2018): 新版土壌学の基礎, 農文協, 131-132, 169-170

50. 松山英俊, 石崎紘三 (1982): 低温下で活性の高い脱窒菌の基礎的研究(1), 水質汚濁研究, 5(2), 161-165
51. 三木正隆 (2015): 有機物分解モデルを用いた土中の水分・窒素成分・二酸化炭素の移動予測, 三重大学修士論文
52. 三浦健志, 奥野林太郎 (1993): ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細, 農業土木学会論文集, 164, 157-163
53. 武藤由子, 堂山貴広, 中西真紀, 渡辺晋生(2019): 蒸発過程にある黒ボク土における硝化を伴う窒素の挙動解析と ATP 量測定, 農業農村工学会論文集, 87(2), I\_281-I\_288
54. 望月賢太, 小林創平, 井原啓貴, 湊山律子, 古賀伸久, 仁科一哉, (2023): 畑条件における有機質資材窒素無機化予測モデルの検証, 土壤肥料学会誌, 94(3), 179-186
55. 渡辺晋生, 中西真紀, 草深有紀, 武藤由子 (2019): 不飽和浸透過程にある異なる温度の黒ボク土中のアンモニア態窒素の硝化, 農業農村工学会論文集, 87(1), I\_1-I\_8

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、非常に多くの方にお世話になりました。

指導教員の渡辺先生には、研究室に配属された学部3年生から博士前期課程2年までの4年間大変お世話になりました。研究に関することだけでなく、資料作りや就職活動等の様々な相談にも乗っていただきました。また、就職活動以降やる気がなかった私にも根気強く付き合ってくださいました。ありがとうございました。

取出先生には、ゼミで的確な指導をいただきました。特に、資料作りでは俯瞰的な視点の重要性に気づくことが出来ました。ありがとうございました。

坂井先生には、ゼミなどでかみ砕いて質問・説明をしてもらいました。おかげで、相手に理解してもらえらるための説明の仕方が分かった気がします。ありがとうございました。

関谷先生には、実験圃場を提供していただきました。また、イネの生育について授業やゼミで学ばせていただきました。ありがとうございました。

実験では、関谷先生の研究室の方々に手伝っていただきました。特に、日々の圃場の水管理をしていただきました。ありがとうございました。

学部から大学院まで一緒に頑張ってくれた鈴木くん、一緒に修了出来てうれしいです。私のやる気がないときには、鈴木くんが頑張っていたことが刺激となり、修士論文完成に向けて取り組めたと思います。ありがとうございました。

最後に、家族をはじめ私を支えてくれた方々のおかげで、修士論文を執筆することができました。本当にありがとうございます。ここに感謝の意を述べ、謝辞といたします。



## 付録

### A 土試料の採取

ここでは、検土杖を用いた採土方法の詳細と、採土日の圃場の様子の2つを示す。

#### A-1 採取の注意点

採土には図に示した道具（検土杖、薬さじ、バケツ、雑巾、ブラシ、袋（ジップロック））を用意する。



図 A-1.1 採土に要する道具

採土を始める前に、バケツに水を張る，ジップロックに圃場の区画名，採土深さ，採取日を記入する，検土杖の持ち手（図 A-1.1 の A）を検土杖本体（図 A-1.1 の B 右側）に取り付けておく必要がある。

次に検土杖の拡大図を示す。



図 A-1.2 検土杖先端（採土側）の拡大

検土杖は1刻み当たり5cmとなっている。また先端を0cmとしたとき、0-5cmの体積は深さ毎に体積が異なる。本研究では深さ25cmの土までを採土する必要があったため、検土杖は30cm（6目盛り）以降が地表面となるよう圃場に刺した。他にも検土杖使用時は、以前刺した箇所と同じ所を選ばないこと，地表面に対し垂直に刺すこと，検土杖について別区画の土（採土区画と同じ区画の土は可）を持ち込まないことに注意する必要がある。

検土杖を目的深さまで刺した後、右もしくは左に数回転する。これは、検土杖の凹部分

の土と検土杖周囲の土を分離するためである。

検土杖を引き抜く際、特に湛水時では地表面の土（検土杖の持ち手に近い側）が検土杖からこぼれ落ちる可能性があるため、引き抜く際には目視で確認する。

検土杖を引き抜いた後の一例となる様子を次に示す。



図 A-1.3 検土杖引き抜き後の一例

特に湛水時は、図のように凹部以上に土が取れていることがある。これは、検土杖を引きぬく際に、垂直に引き抜けず検土杖周囲の土が付着するためである。この場合、検土杖の目的深さと付着した周囲の土の深さは異なるため、検土杖凹部より盛り上がっている部分のみ取り除く必要がある。

検土杖の土は藁さじを用いてジップロックに入れる。深さは、検土杖の持ち手側から地表面となる。検土杖を引き抜く際に地表面の土がこぼれ落ちた場合、落ちた土の深さを考慮する必要がある。また、検土杖先端（0-5 cm）は深さ毎に体積が異なるため、土を採取してはならない。

土の採取が終わったら、検土杖周囲の土を藁さじで払い落とし、同一区画の土を目的回数採取する（本研究は4点法）。

ジップロックは先端のチャック部分をあらかじめ裏返しにしておくことで、チャック部分の汚れを防ぐことが出来る。また、地表面の土は、特に湛水時では検土杖での採土が難しいため、藁さじで直接土を採取してもよい。

目的回数土を採取したら、ジップロックを閉じる。閉じる前に、ジップロック内の土を入念に混ぜ、中の空気を抜く必要がある。

別区画の土を採取する際、検土杖と藁さじは、バケツに入った水とブラシを用いて洗い、その後タオルでふき取る。

## A-2 採土日の圃場の様子

採土日に各区画の圃場の様子を撮影した。その様子を次に示す。

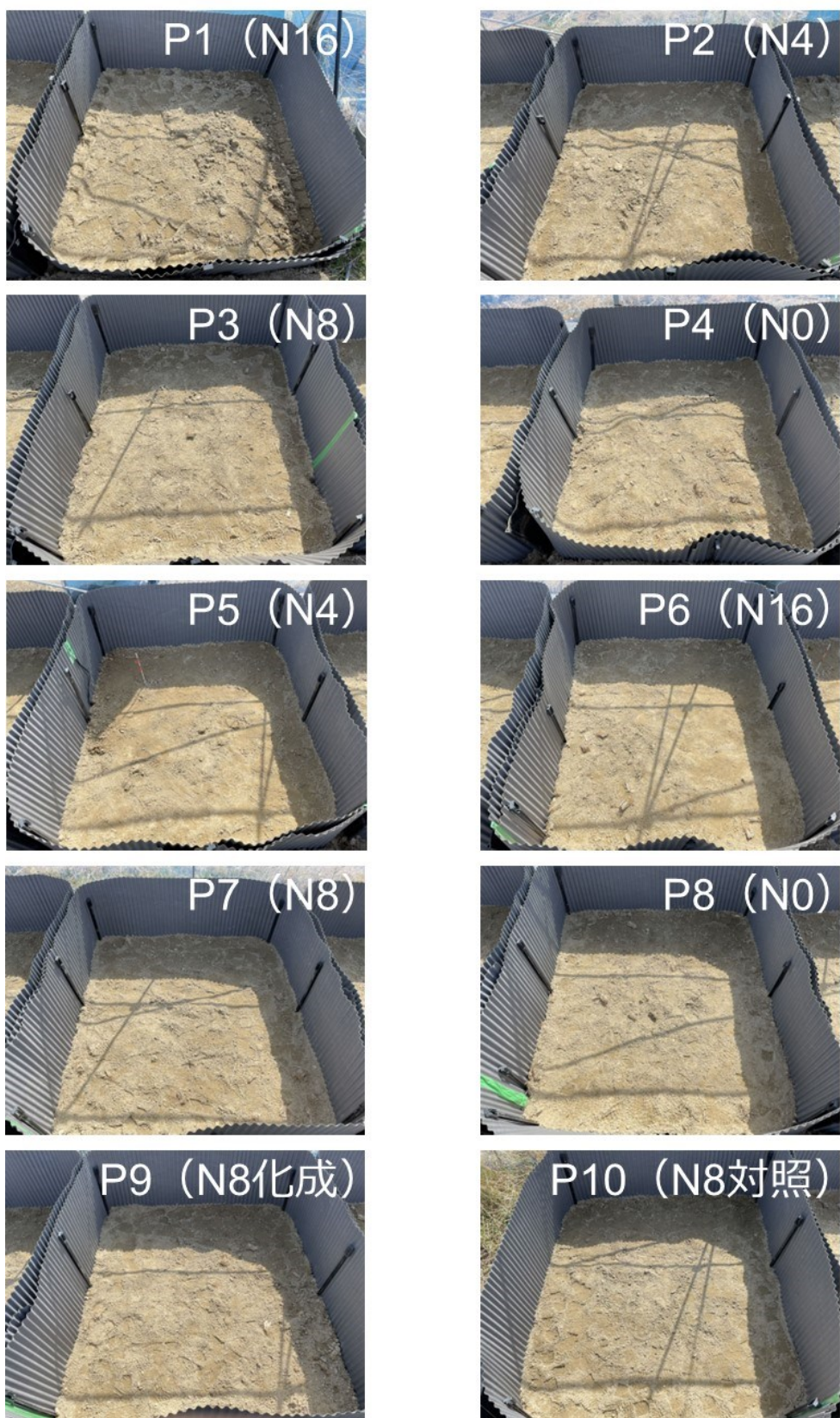


図 A-2.1 3 月 17 日



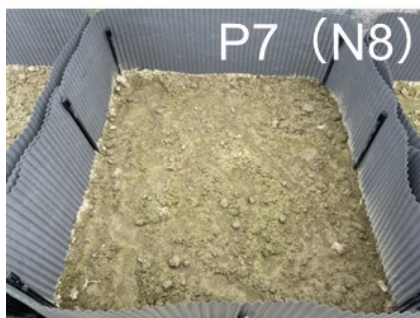
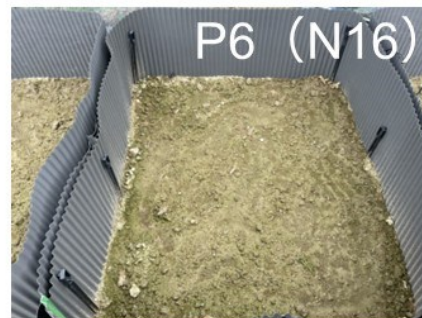
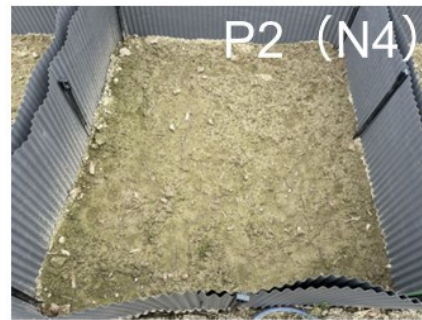
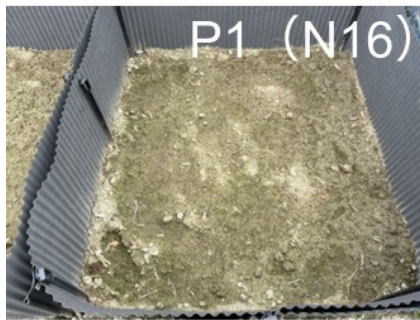


图 A-2.2 4 月 2 日



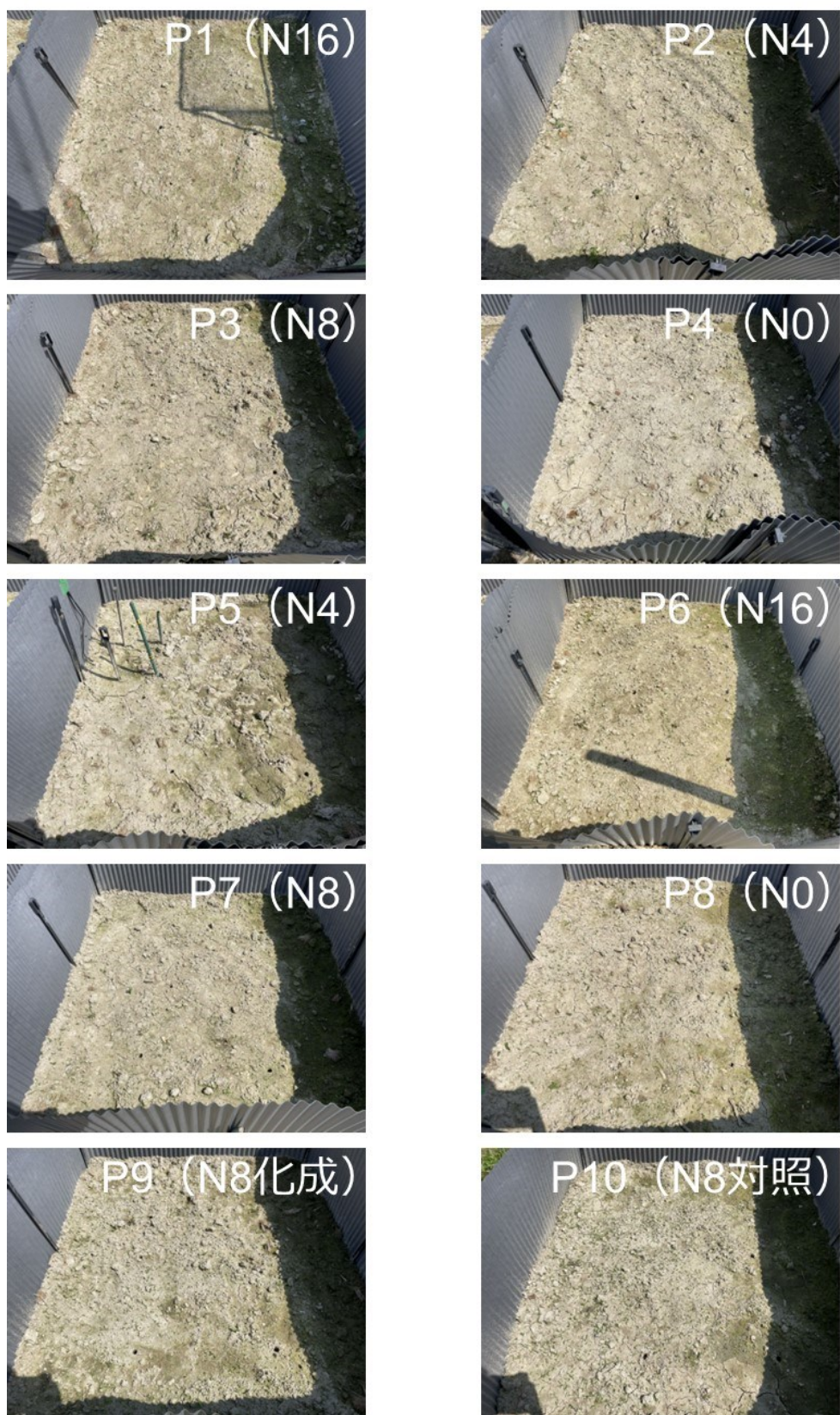


図 A-2.3 4 月 12 日



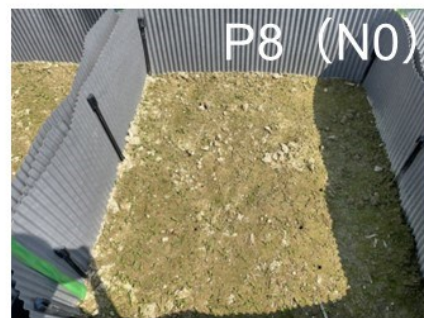
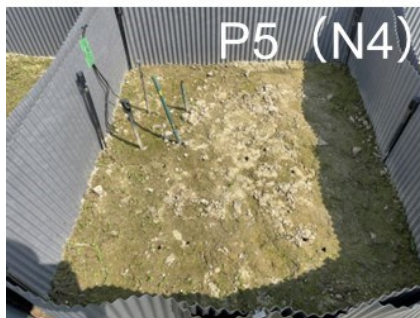
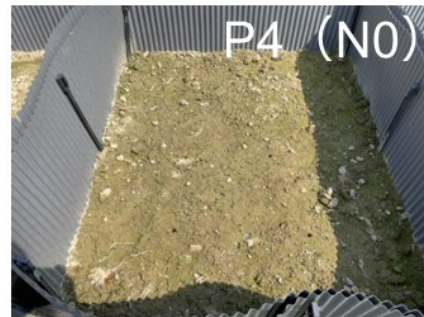
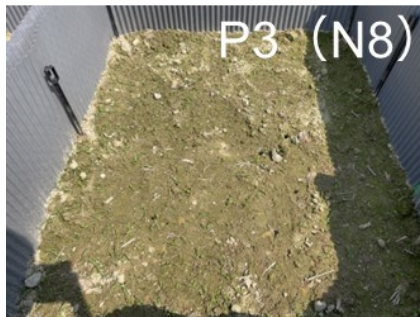
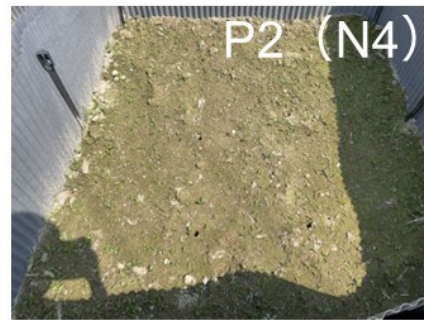


図 A-2.4 4 月 20 日



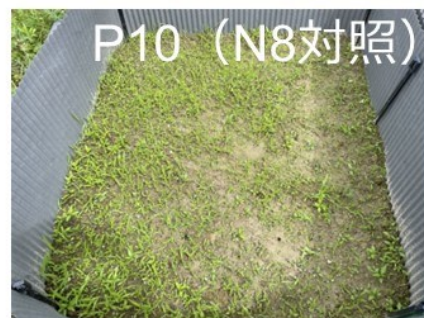
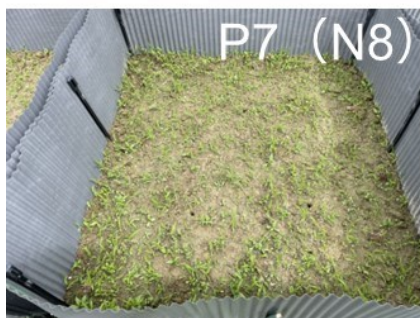
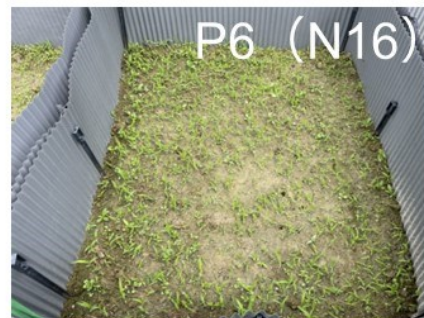
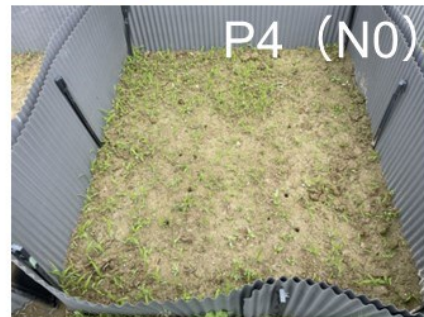
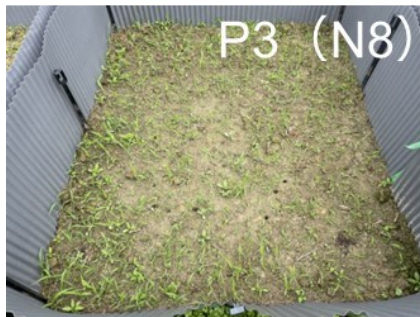
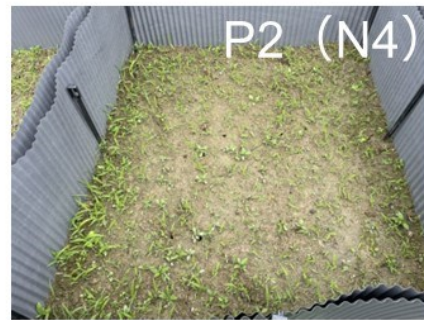
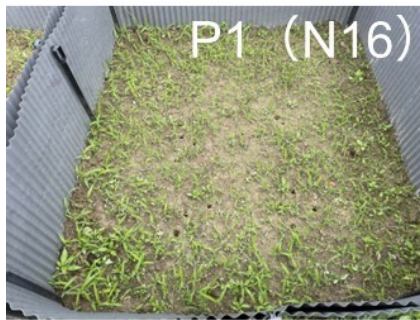


図 A-2.5 4 月 30 日



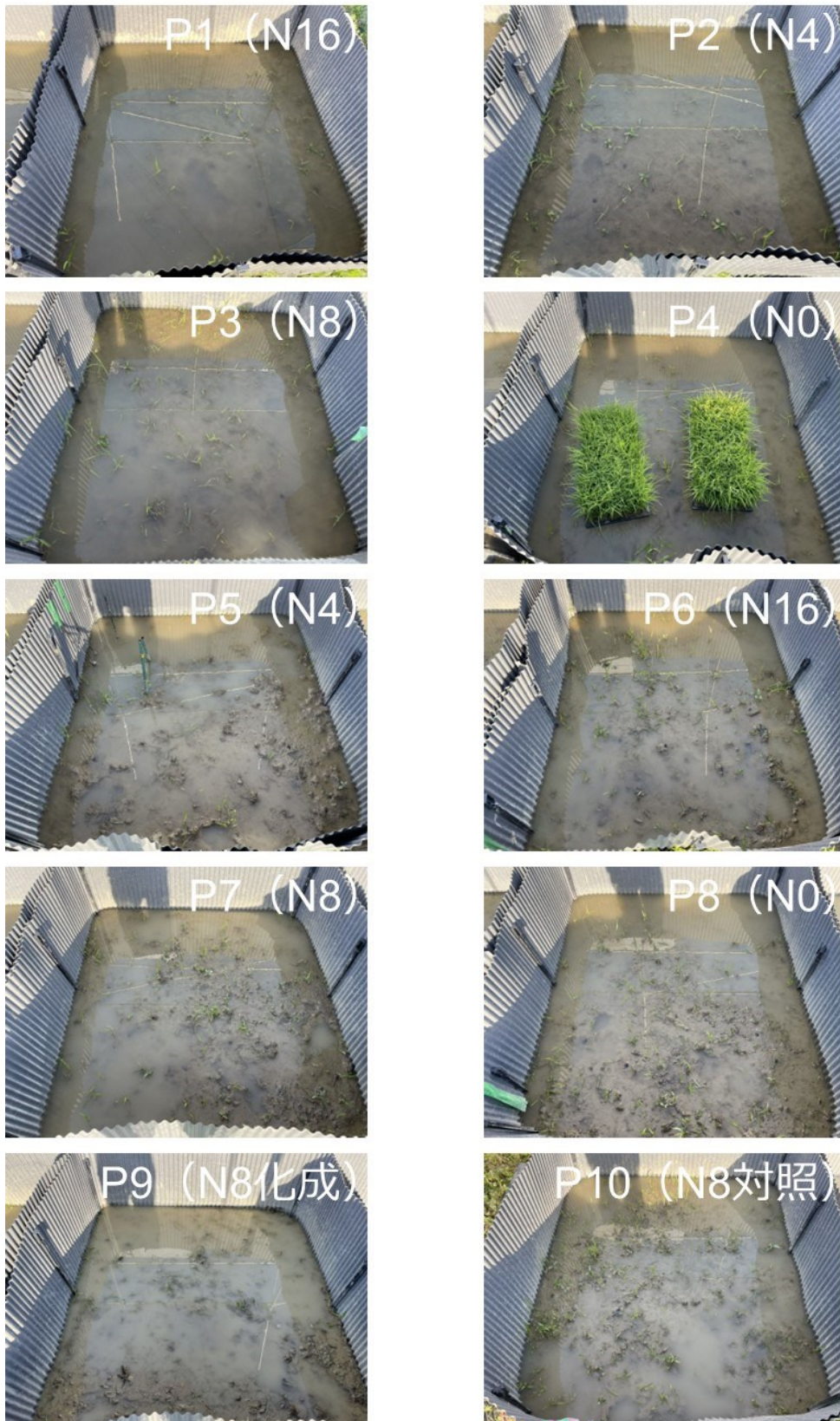


図 A-2.6 5 月 14 日



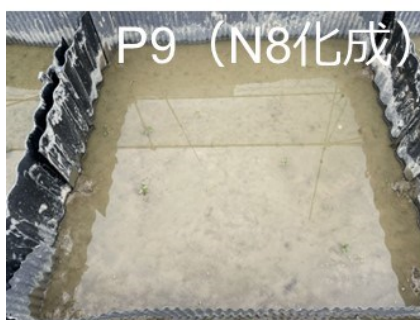
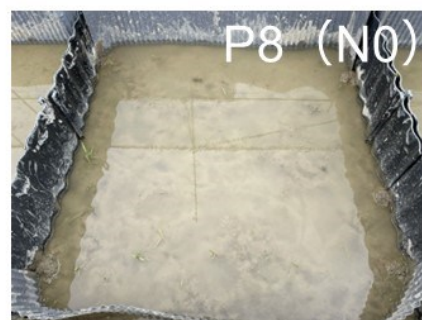
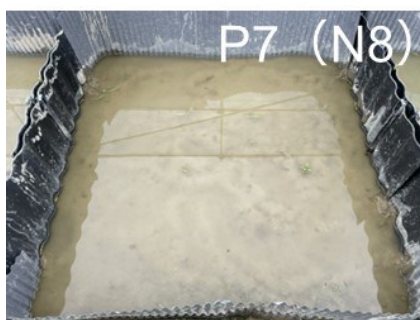
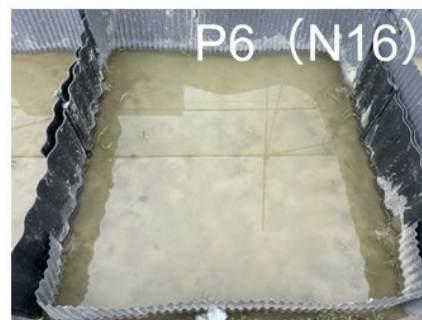
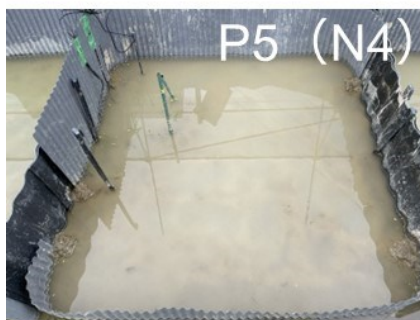
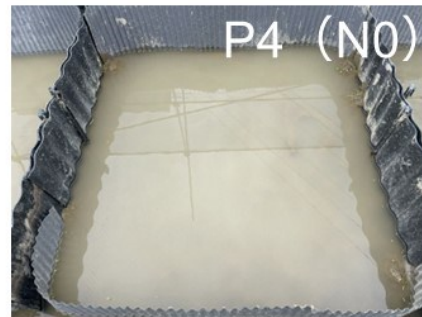
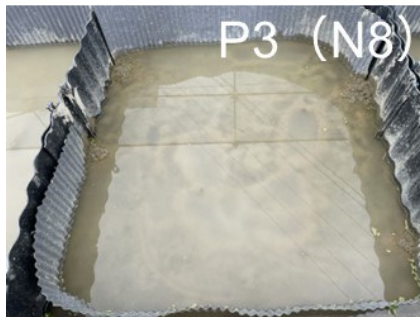
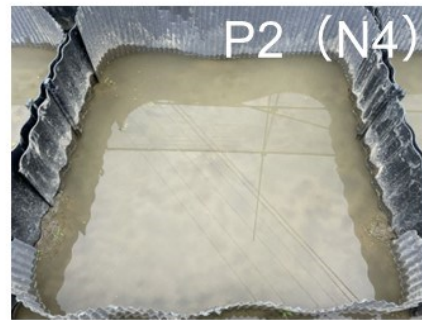
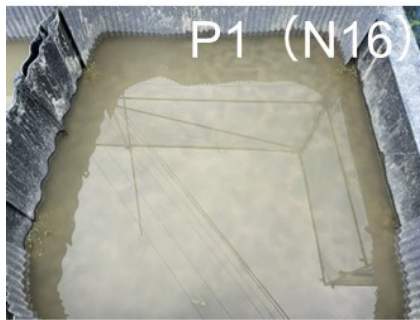


図 A-2.7 5 月 31 日

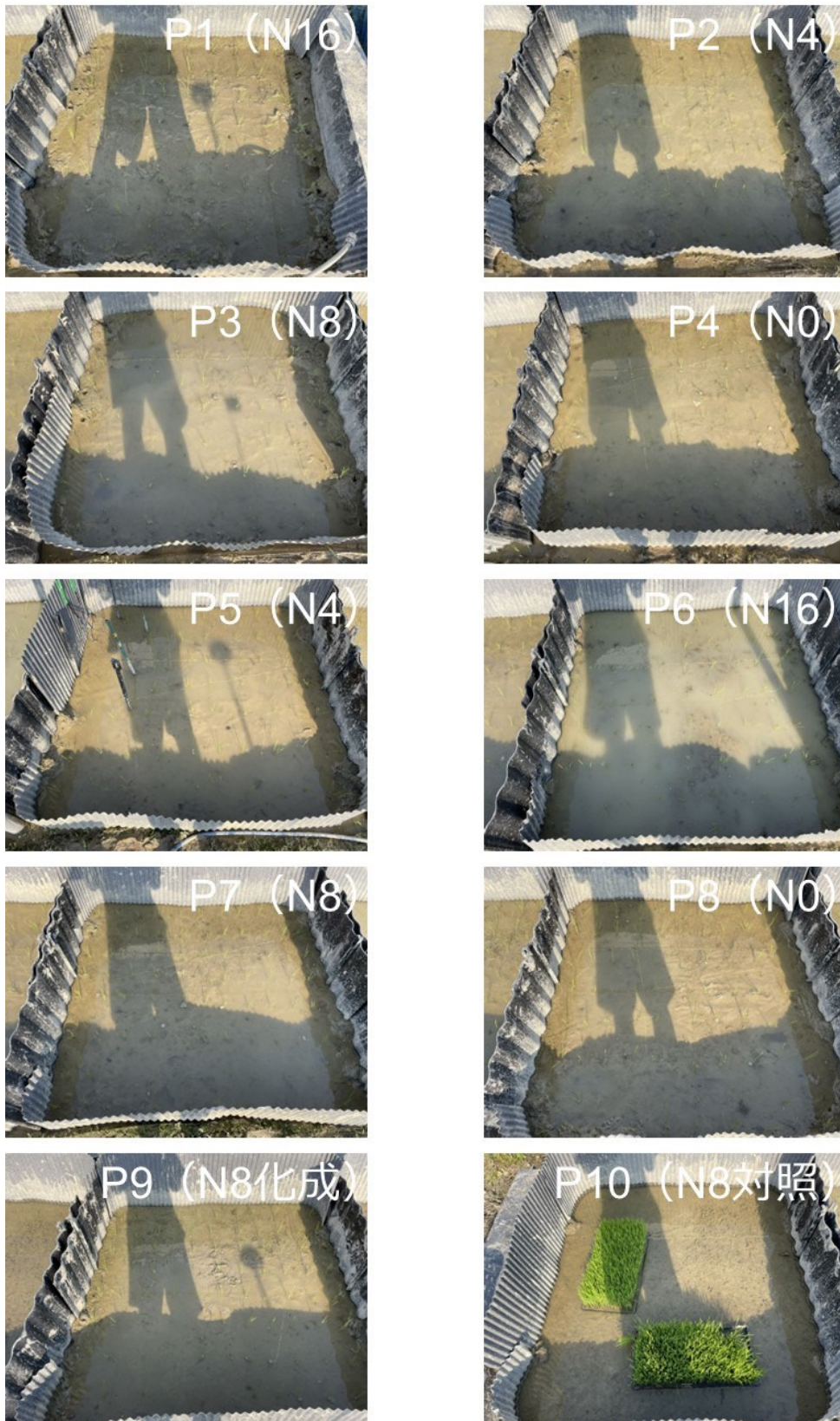


図 A-2.8 6月3日



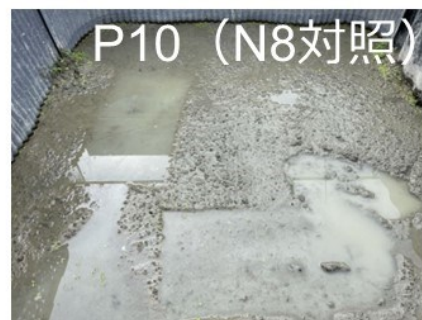
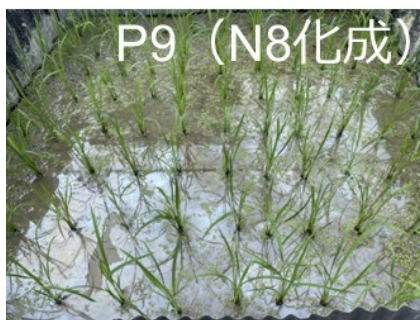
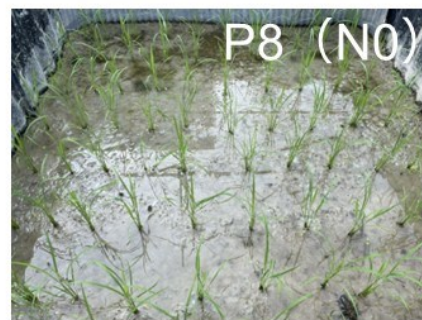
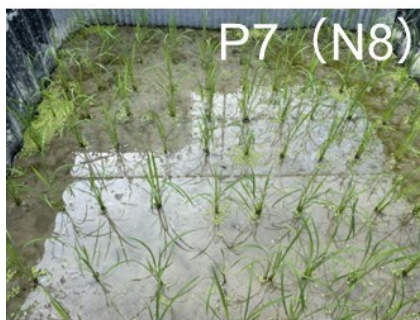
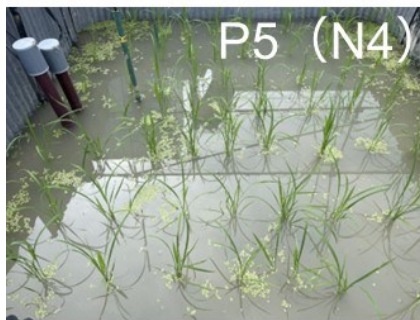
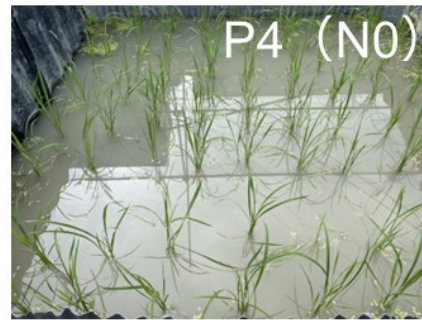
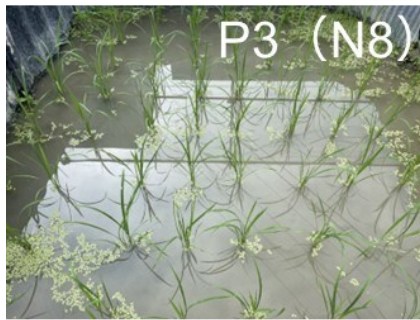
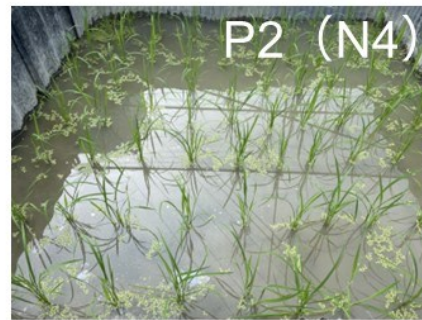
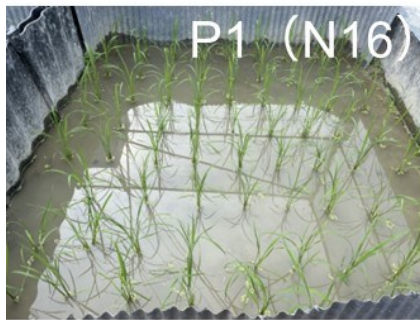


図 A-2.9 6 月 20 日



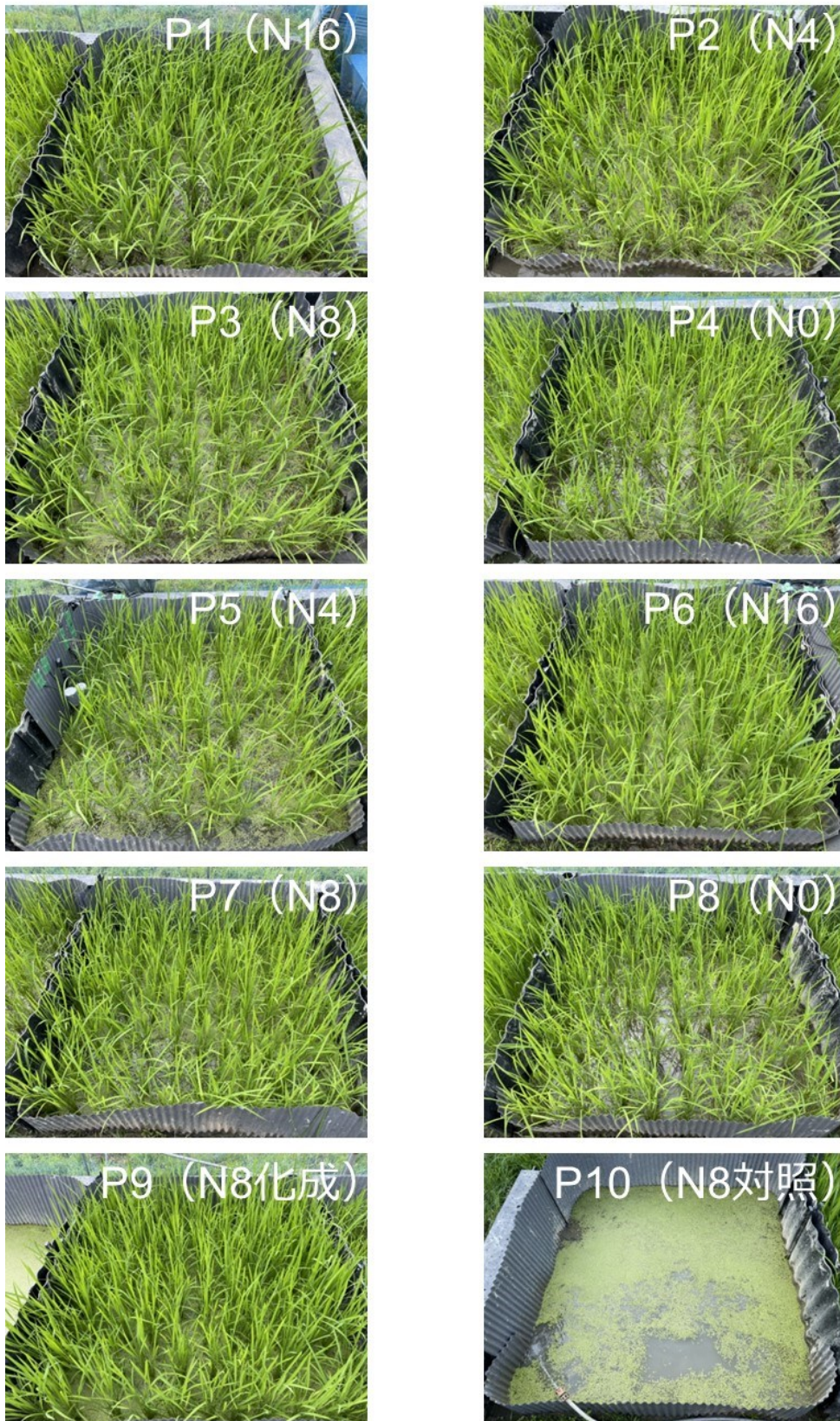


図 A-2.10 7月7日



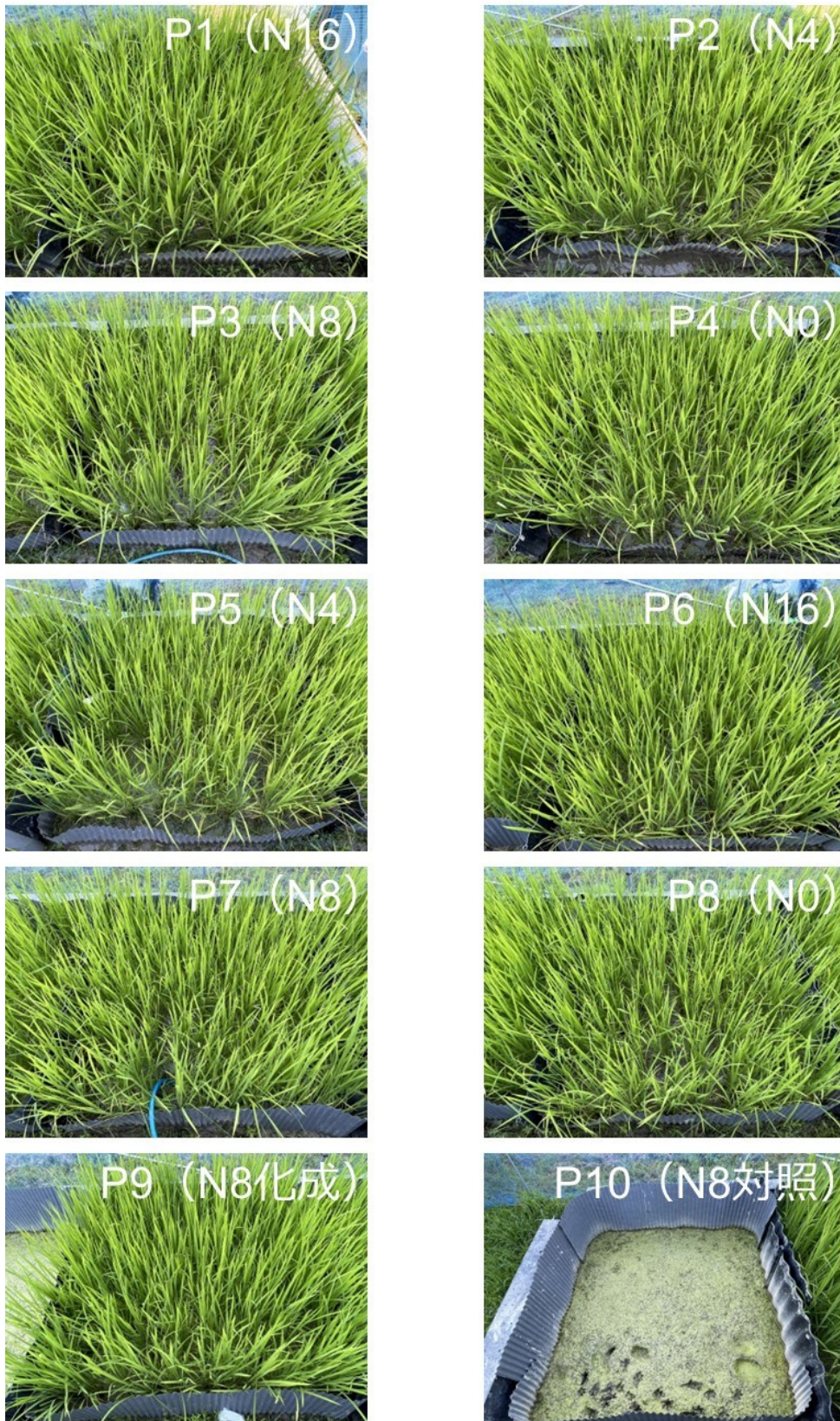


図 A-2.11 7月24日



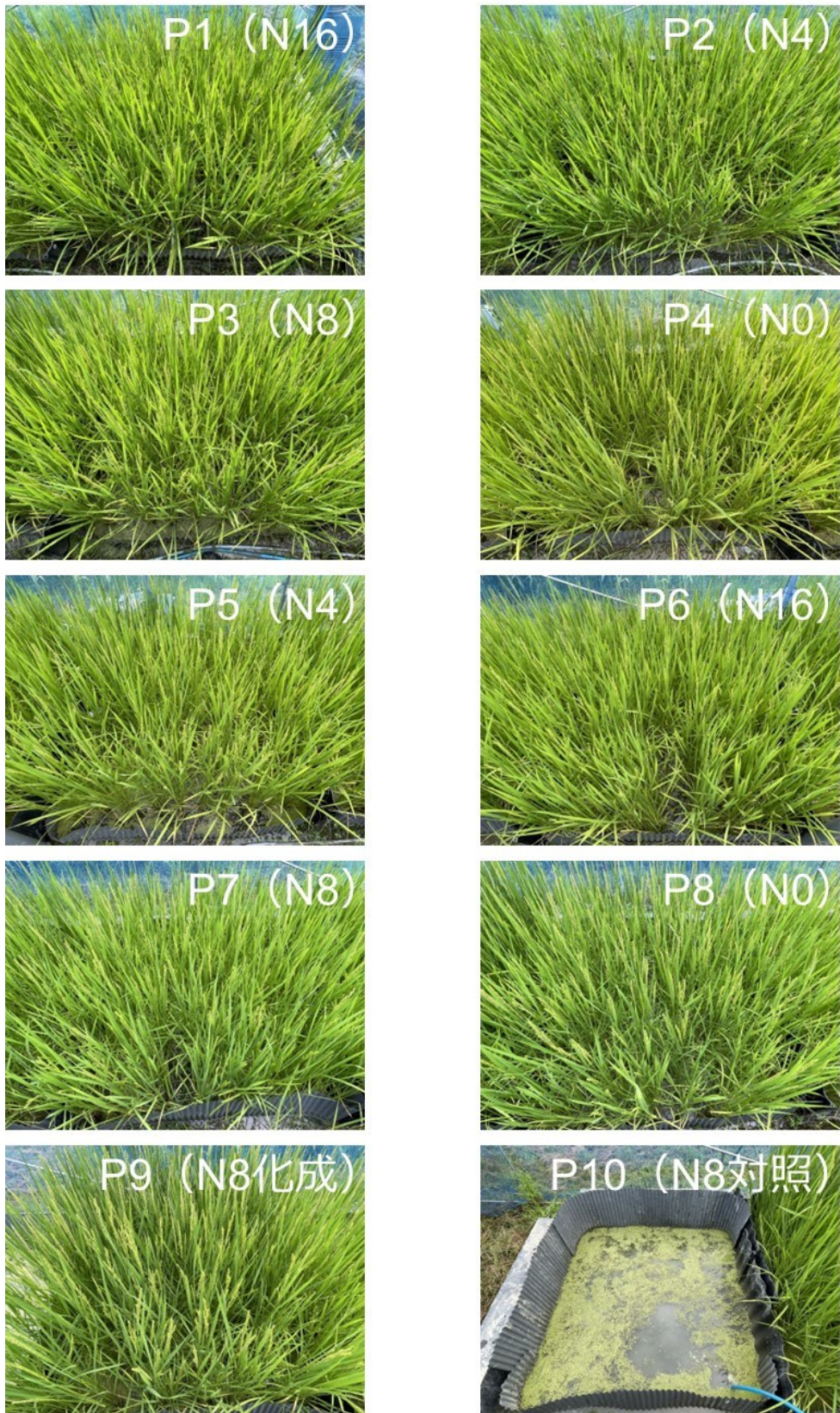


図 A-2.12 8月11日



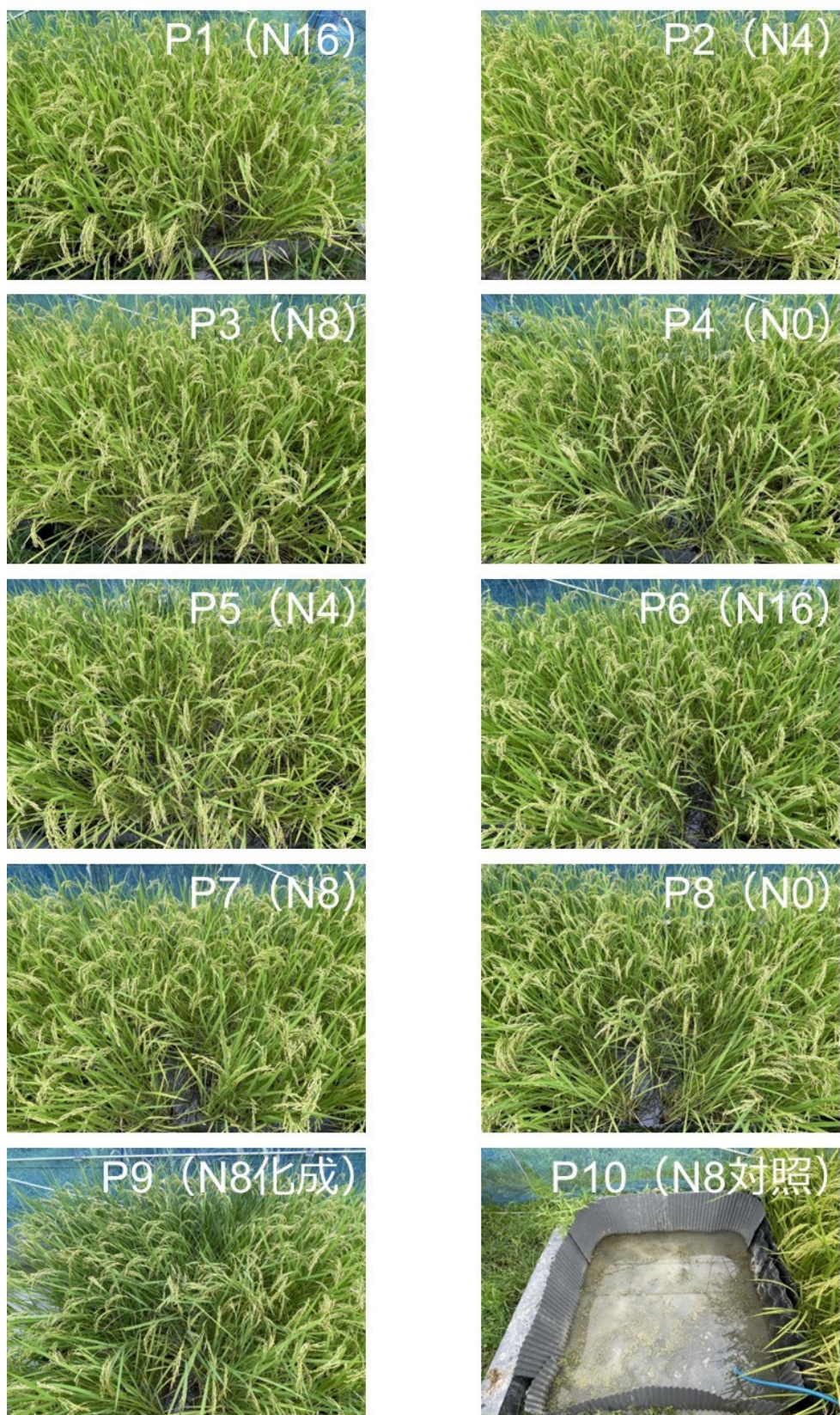


図 A-2.13 8月27日



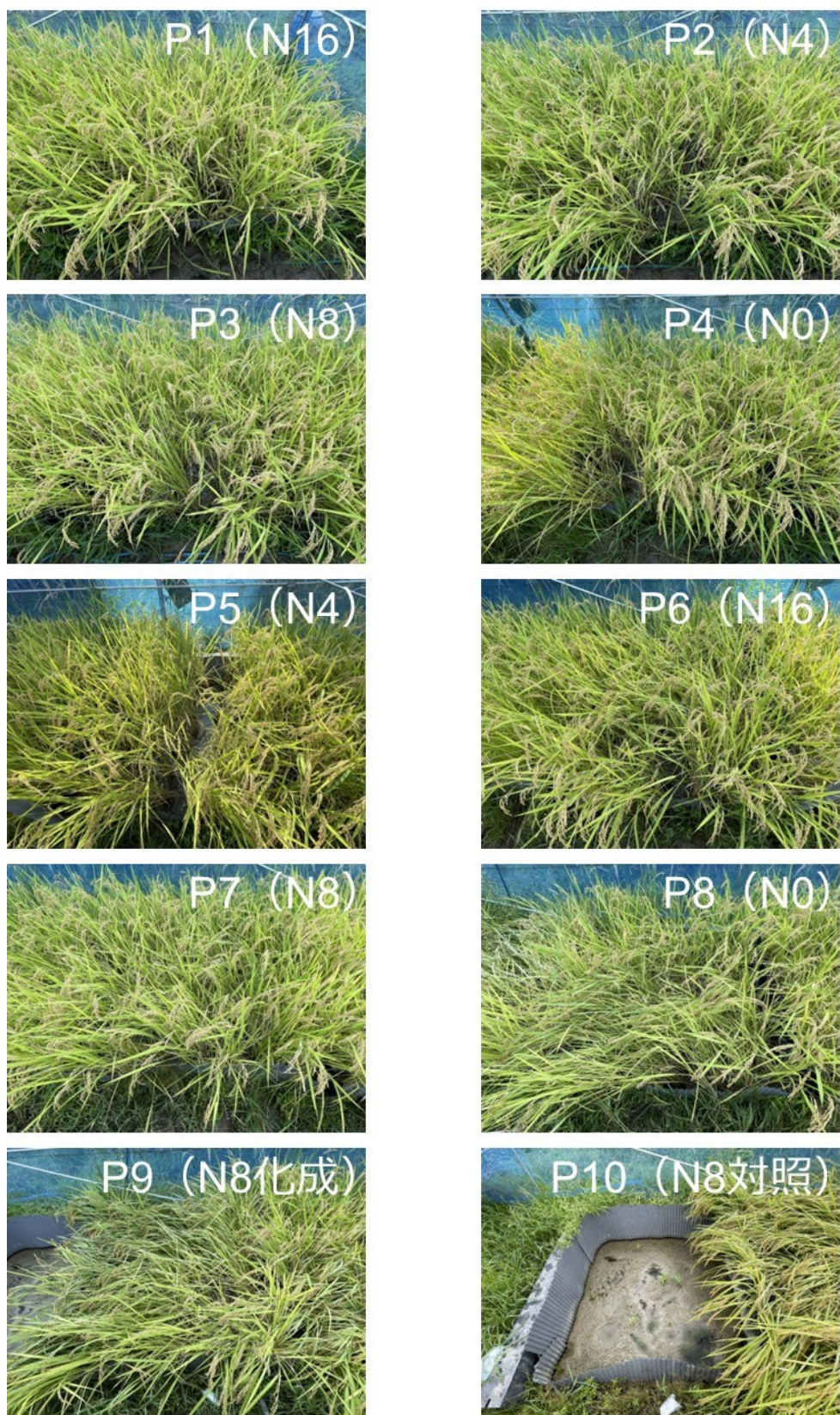


図 A-2.14 9月13日



## B NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N の測定

ここでは、採取した土試料に含まれる NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N の測定に必要な抽出方法と、DR6000 吸光光度計を用いた測定方法について示す。

### B-1 抽出方法

全量 NH<sub>4</sub>-N は 10%KCl 溶液, NO<sub>3</sub>-N は蒸留水で抽出した。以下にそれぞれの抽出方法を述べる。まず、採土した土を KCl 抽出は 3 g, 水抽出は 5 g 量りとり, 50 mL の遠沈管に入れた。重さの誤差範囲は+0.045 g である。土を入れた遠沈管に、KCl 抽出は 10 %KCl 水溶液を 25 mL, 水抽出は蒸留水を 40 mL を加え、震盪機で 1 時間震盪した。

震盪後、懸濁液を遠心分離機にかけ、土粒子を沈殿させた。遠心分離は 4000 rpm で 10 分間行った。遠心分離後、KCl 抽出は 15 mL シリンジ, 水抽出は 30 mL シリンジに上澄み液を取り, 孔径 0.45 μm のろ紙でろ過した。ろ紙にはアドバンテック社製の直径 25 mm のメンブレンフィルター（図 B-1.1）を, フィルターをセットするろ過装置には, 専用のプラスチックホルダー PP25（図 B-1.2）を使用した。フィルターを取り出す際には先の丸いピンセットを用い、フィルターに傷をつけないよう注意した。ホルダーにシリンジを装着し、ろ過を行った。

水での抽出液は、液中の細かい土粒子が 0.45 μm の孔隙を通過することにより、ろ液が濁る場合がある。その場合、フィルターに抽出液を通し、少し目詰まりさせ、シリンジの手ごたえを感じた後でろ液を回収する、透明な液色のろ液を得られる。フィルターが完全に目詰まりした場合、根詰まりした土を吸い上げるように注射器を引く、または注射器とホルダーを外してホルダーを解体し、フィルターに溜まった土をキムワイプでふき取ることで、ろ過が再開できる。フィルターは試料ごとに替え、注射器とホルダーは試料ごとに洗浄し、キムタオルで水分を除き使用した。

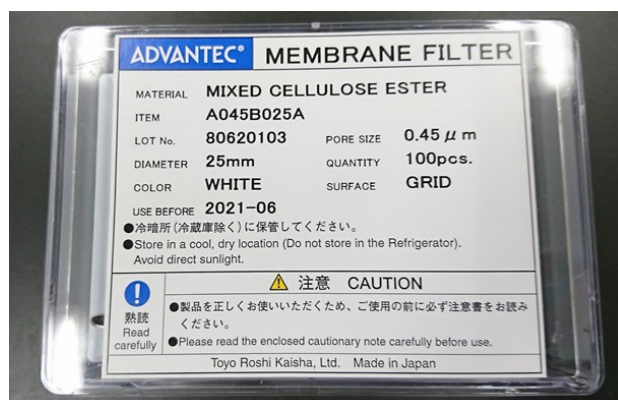


図 B-1.1 メンブレンフィルター



図 B-1.2 プラスチックホルダー

## B-2 吸光光度計（DR6000）

### 〈測定原理〉

DR6000 では、液中の被測定物質と試薬をセル内で反応させ、変化した液色より濃度を出力する。液色の補色光の透過率  $T$  [%] を測定し、吸光度  $A$  および溶液濃度  $C$  に換算する。

物体の色が濃いほど、その補色光は物体に吸収され、補色光の吸光度  $A$  は高くなる（太田ら，2004）。この時、吸光度  $A$  と透過率  $T$  には式 B-2.1 が成り立つため、物体の補色光の透過率  $T$  を測定することで、その吸光度  $A$  を求めることができる（図 B-2.1）。

$$\text{吸光度 } A = -\log \frac{I}{I_0} = -\log \frac{T}{100} \quad \text{式 B-2.1}$$

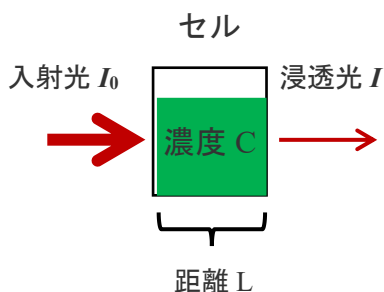


図 B-2.1 セルを通過する補色光

吸光度  $A$  と溶液濃度  $C$  には、ランバート・ベール則（式 B-2.2）が成り立つ。

$$\text{吸光度 } A = \varepsilon LC \quad \text{式 A.2}$$

$L$  は光が通過する距離、 $C$  は溶液の濃度、 $\varepsilon$  は比例定数である。この法則は、吸光度が距離  $L$  と溶液濃度  $C$  との間に比例関係をもつことを示している。DR6000 は、この関係を用いて吸光度  $A$  から溶液濃度  $C$  を算出している。

## 〈測定方法〉

DR6000 は、短期間使用しない場合スリープモードにしておく。スリープモードから立ち上げた際は 1 分ほど、自動で光源や電圧のテストなどの自己診断が行われる。自己診断が終了すれば使用可能となる。

本実験で用いたセルは角形 10 mL セル (図 B-2.2) である。セルは 2 つ 1 組となっており、同じ番号が記してある。また、同じセルで  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の測定をしてはならない。

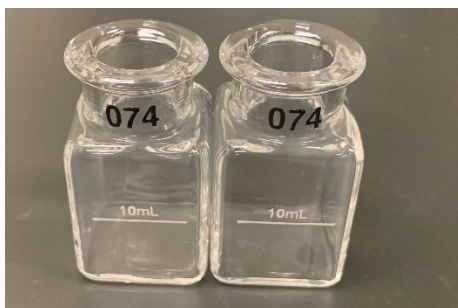


図 B-2.2 角形 10 mL セル

## 〈アンモニア態窒素の測定方法、原理、注意点〉

測定法 : サリチル酸塩法

測定範囲 : 0.01~0.50 mg/L

使用試薬 : サリチル酸アンモニア試薬

シアヌール酸アンモニア試薬

(TOADKK コード : HACH1389)

### 〈測定方法〉

1. DR6000 の画面上で、内蔵プログラムのサリチル酸塩法を選択する。
2. 1 組の 10 mL セルを用意し、1 つには土壌抽出液 10 mL、もう 1 つには純水 10 mL を入れる。
3. 2 つのセルにサリチル酸アンモニア試薬を加えて専用の栓をし、振って溶解させる。試料の振り方は図 B-2.3 に示した。
4. 3 分間の静置後、2 つのセルにシアヌール酸アンモニア試薬を加えて専用の栓をし、振って溶解させる。
5. 15 分間の静置後、純水を入れたセルを DR6000 のセルホルダ (図 B-2.4) に挿入し、DR6000 の画面上の「ゼロ」を押し、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度 0.00 mg/L という基準を作る。
6. 次に土壌抽出液を入れたセルをセルホルダに挿入し、画面上の「測定」を押し、その吸光度を測定する。その吸光度と、基準となった吸光度から、土壌抽出液の  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が計算され、画面上に計算値が出力される。



図 B-2.3 試薬溶解時の振り方



図 B-2.4 セルホルダ

#### <測定原理>

$\text{NH}_4\text{-N}$  は、塩化物と結合しモノクロアミンを形成する。モノクロアミンはサリチル酸塩と反応し、5-アミノサリチル酸塩を形成する。これが1つ目の試薬であるサリチル酸塩アンモニア試薬を加えた時の反応である。

5-アミノサリチル酸塩は、ニトロプルシドナトリウム触媒がある場合に酸化し、青色の混合物を形成する。2つ目の試薬であるシアヌール酸アンモニア試薬にはその触媒が含まれているため、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が高いほど青色混合物が生成され、青色が濃くなる。また、試薬は水溶液中で黄色であるため、最終的に緑色の水溶液となる。吸光度の測定には、655 nm（赤）の波長を用いる。

#### <注意点>

$\text{NH}_4\text{-N}$  測定の際に用いるサリチル酸アンモニア試薬、シアヌール酸アンモニア試薬の中には、つぶつぶの（一粒が大きな塊になっている）試薬もある。これを用いると、振盪時にすべて溶解しないものが多いので使用を控える。経験上、購入してから4ヵ月程度経過した試薬は粒粒になっていることが多いため、早めに破棄するとよい。あまりにもつぶつぶの試薬が多ければ、先生に相談する。

### 〈硝酸態窒素の測定方法，原理，注意点〉

測定法 : カドミウム還元法

測定範囲 : 中濃度 0.1～10.0 mg/L , 高濃度 0.3～30.0 mg/L

使用試薬 : 硝酸塩試薬 (TOADKK コード : HACH0586)

#### ＜測定方法＞

1. DR6000 の画面上で、内蔵プログラムのカドミウム還元法を選択する。
2. 10 mL セルに土壌抽出液 10 mL を入れ、DR6000 のセルホルダに挿入する。DR6000 の画面上の「ゼロ」を押し、 $\text{NO}_3\text{-N}$  と試薬の反応前における吸光度を測定する。これで試薬ブランクの吸光度が測定される。画面には 0.0 mg/L  $\text{NO}_3\text{-N}$  と表示される。
3. セルに硝酸塩試薬を加えて専用の栓をし、1 分間上下に振って溶解させる (図 B-2.5)。
4. 5 分間の静置後、セルを DR6000 のセルホルダに挿入し、画面上の「測定」を押し、その吸光度を測定する。その吸光度と、試料ブランクの吸光度から、土壌抽出液の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が計算され、画面上に計算値が出力される。



図 B-2.5 一分間浸透時の振り方

#### ＜測定原理＞

試薬であるカドミウム金属は、抽出液中の硝酸塩を亜硝酸塩に還元する。亜硝酸塩イオンは酸媒体の中で、試薬中のスルファニル酸と反応し、ジアゾニウム塩という中間生成物を形成

する。これが同じく試薬中のゲンチシン酸と反応し、琥珀色の溶液となる。吸光度の測定には、中濃度の測定であれば 400 nm（紫），高濃度の測定であれば 500 nm（青緑）の波長を用いる。

<注意点>

カドミウム還元法で使用する硝酸塩試薬は白色の粉であるはずだが、中には黄色になっている試薬もいくつかある。黄色の試薬は不良品であり、これを用いるとうまく測定できないため使用しない。あまりにも不良品の数が目立つようになってきたら、先生と相談のうえ HACH 社に連絡すること。

## C 全自動元素分析装置の測定方法

植物サンプルは 55 °C で 24 時間以上炉乾燥したものを使用した。移動の際には、水分が加わらないようデシケータに入れて移動した。測定は通常、各試料 2 連または 3 連で行い、平均値から各元素量を求める。本研究では過去のデータや同一日に採取した試料と比較し、怪しい試料は 2 度目の測定をした。作成時にはゴム手袋を着用して行った。まず、スズホイルで器を作った。マイクロ天秤にのせ、マイクロ天秤の扉を閉めてから 0 に合わせた。スズホイルの扱いはピンセットを使用した。スズホイルを取り出し、試料を入れ目的の重量（植物サンプルは 3-5 mg）とした。スズホイルの器は不安定な形状のため、中の試料をこぼさないように注意して作業した。スズホイルを試料が出ないように丸め、さらに圧縮して錠剤型にした。作成した試料を鏡の上に数回落として、中の試料が出てこないか確認した。確認できたら試料をマイクロ天秤にのせ、重量を記録した。作成した試料はどの試料か分からなくならないよう、順に容器に入れた。

各元素は、機械内蔵の検量線を用いて算出されるが、その検量線では低濃度あるいは高濃度の値が怪しくなることがある。そこで、本実験においては装置を使用する際、毎回自ら検量線を引いて求めた。検量線の引き方を以下に示す。試料を測定する前に、アセトアニリドをおよそ 0.1, 0.5, 1, 2, 3 [mg] の 5 点で測定した。その測定値から Blank の平均値を引き、アセトアニリドの重量と N, C, H の Area の検量線を引いた。検量線に本試料の N, C, H の Area を代入し、アセトアニリドの相当量を算出した。さらに、アセトアニリドの組成 (N : 10.36%, C : 71.09%, H : 6.71%, O : 11.84%) をかけて N, C, H 含有量を算出した。

### < 注意点 >

装置を始業する前に、装置内の還元銅が十分に残っていることを確認し、灰分を取り除く。還元銅が無くなる恐れがあるため、一度に多量のサンプルを仕掛けない。一度に測定する試料数は 30 サンプル×2 連の 60 サンプル程度にすること。マイクロ天秤使用後は、専属の筆などを使い掃除をすること。