

## 田畑輪換田における土壌の窒素発現と水稻 (*Oryza sativa* L.) による窒素吸収の圃場間と年次間の変異—奈良盆地における4年間の比較—

池永幸子・松本二香・井上博茂・稲村達也

(京都大学大学院農学研究科)

**要旨：**本研究は、輪換田における土壌の窒素発現と水稻 (*Oryza sativa* L.) の窒素吸収を一毛作田と比較することによって明らかにすることを目的とした。調査は、2000年から2003年、奈良県桜井市大西の窒素無施肥条件下の試験区水田を対象に実施した。これらの水田は、水稻—コムギ—ダイズの2年3作の田畑輪換を行う二つのブロック (総面積29 ha) と、水稻—一毛作を行う水田 (0.3 ha) に分かれている。輪換田土壌の窒素発現量は、一毛作田と比較して増加せず、それは輪換が繰り返されることで全窒素、全炭素が低くなることが原因と考えられた。出穂期と成熟期の水稻による窒素吸収率と水稻窒素保有量は、一毛作田に比較して輪換田で高くなり、1穂穎花数の増加によって輪換田水稻が多収となった。調査期間内において、輪換田土壌の窒素発現量は年次間で一定であるが、ブロック間で大きく異なった。このブロック間差の一因として輪換田間で異なる土壌の物理化学性とブロック間で異なる水稻作付け前の気象条件が考えられた。このようなブロック間変異は、田畑輪換での土壌の物理化学性の空間変異に応じた水稻の窒素施肥管理に有為な技術情報であると考えられた。

**キーワード：**一毛作、水稻、田畑輪換、窒素、窒素発現。

奈良盆地では、水不足への対応と棉作など換金作物栽培の商業的背景から田畑輪換が江戸時代から行われてきたと推定される (斉藤 1957, 宮本 1994)。田畑輪換の実施面積は、戦時下の食料増産政策を受けて激減し、戦後の自由経済下で一時回復するものの農家の兼業化および吉野川水系での農業用水整備などにより衰退した。しかし、1979年の水田利用再編対策以降、転作地を団地化する地域ぐるみの転作推進の流れを受け、集落の水田群を数ブロックに分割し、ブロック毎に水稻と転作作物を集落ぐるみで計画的に順次作付ける集団転作として田畑輪換が再び実施されるようになった。この集落ぐるみで行う営農方式は集落営農の一形態である。集落営農とは、1つ以上の集落を基礎単位として、農地、労働、資本財、経営管理の一部または全部を集団化することで地域の農業生産の維持と高い農業生産性を実現する営農形態である (高橋 2003)。集落営農は、現在の日本の農業が抱える農業担い手不足や国際競争力の向上等の解決の糸口となり得ると考えられている。また、田畑輪換は、作物生産力の向上などの利点とともに、病虫害や雑草害の軽減、連作障害の防止などの効果から環境保全型農業における、重要な技術の一つとされている (松村 2001)。しかし、集落営農によって田畑輪換をブロックローテーションで実施している水田ブロックでは、水稻の生育・収量の変異は空間依存性を示し、その空間変異は地力に強く支配されるため、地力と水稻生育の空間変異に応じた管理の必要性が指摘されている (Inamura ら 2003, 2004)。一方、田畑輪換を実施している水田では、輪換後一年目の水稻の生育・収量が水稻一毛作田に比較して増大する乾土効果 (上郷 1953) とともに、その一因と考えられる土壌からの窒素発現量の増加が、中粗粒質灰色低地土 (廣川ら

1995) から低湿重粘土 (西天・山室 1988) において確認されている。土壌からの窒素発現パターンは重粘土や中粗粒質灰色低地土など土性によって異なる (西天・山室 1988, 廣川ら 1995)。廣川ら (1995) は、輪換田における窒素発現量は土壌中の有機物の質とその集積条件や土壌の団粒構造に支配されていると推察している。また、輪換田土壌からの窒素発現量の年次変動は  $4.8 \text{ kg/10 a}$  から  $7.8 \text{ kg/10 a}$  と大きく、湛水前の土壌乾燥の程度と土壌窒素無機化量との関係および湛水後の地温変動が、年次変動の主たる要因と考えられている (鳥山 1990)。また、輪換田での窒素発現は前作作物の種類やその作付け期間によって影響を受けるとされている (種田ら 1992, 北田ら 1993)。また、輪換田では、一毛作田と比較して酸化的な土層の発達により水稻根系が拡大し、活力が高くなるため、輪換田水稻の元肥窒素吸収率や土壌由来窒素の吸収率が高くなるとされる (金田ら 1989a, 狩野ら 1991)。以上のように、田畑輪換を実施している水田群では土壌からの窒素発現量と水稻による窒素吸収量が年次変動を示すとともに、それらの圃場間差が水稻生育・収量の空間変異の挙動に関与している可能性がある。そのため、田畑輪換を取り入れた集落営農では、土壌からの窒素発現と水稻による吸収の連年動態とそれらのブロック間変異を明らかにし、その空間変異に応じた栽培管理を行う必要があると考えられる。しかし、集落営農で田畑輪換を実施している水田群を対象にこれらの連年動態と空間変異を総合的に解析した事例は皆無である。

そこで、本研究では、集落営農方式で田畑輪換を行っている奈良県桜井市大西の水田を対象に輪換田と一毛作田における土壌からの窒素発現と吸収の動態を連年調査し、集落営農における水稻栽培において重要な栽培管理基準と考

えられる土壌からの窒素発現と吸収動態のブロック間と年次間の差異および年次間変動とブロック間変異に及ぼす土壌特性の影響を明らかにすることを目的とした。

## 材料と方法

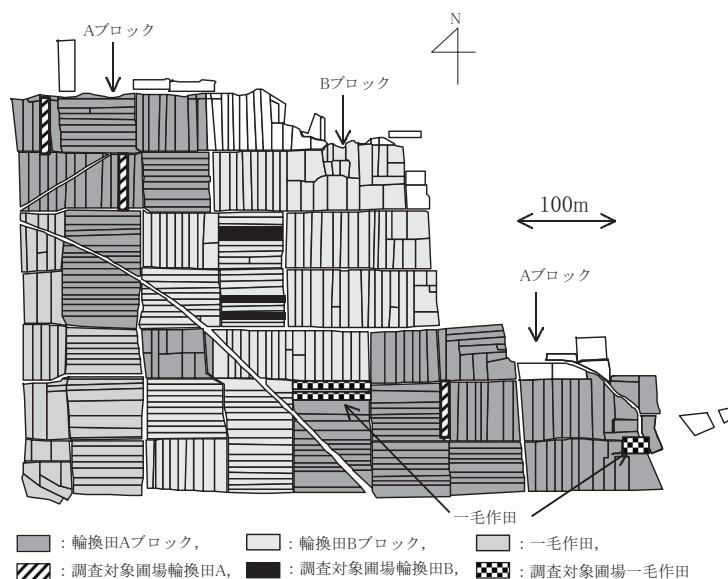
### 1. 調査圃場

圃場試験は、2000年から2003年にかけて奈良県桜井市大西（東経135.49° 西経34.32° 海拔65 m）の水田で実施した。土壌は、灰色低地土である。試験地のある大西地区の水田29 haは、灌漑水系によって大きくAブロック（17 ha）とBブロック（12 ha）に分かれ、水稻-コムギ-ダイズの2年3作の田畑輪換を集落営農方式で実施している。調査圃場は、輪換田Aブロック内の3圃場と輪換田Bブロック内の3圃場およびAブロック内の水稻一毛作田の3圃場とした（第1図）。各調査圃場の作付け順序を第1表に示した。以下、輪換田Aブロック内の調査圃場を輪換田A、輪換田Bブロック内の調査圃場を輪換田B、そしてAブロックで水稻が栽培された2001年、2003年の一毛作田を一毛作田（01, 03）、Bブロックで水稻が栽培された2000年、2002年の一毛作田を一毛作田（00, 02）と区別して表記することとした（第1表）。

大西地区で栽培される水稻品種は「ヒノヒカリ」、ダイ

ズ品種は「ニシムスメ」、コムギ品種は「キヌイロハ」である。大西地区における水稻慣行施肥（成分量）は、基肥として窒素7.5、リン酸7.5、カリウム7.5  $\text{gm}^{-2}$ の全層施用、穂肥は窒素3~4.5、リン酸0.8~1.2、カリウム3~4.5  $\text{gm}^{-2}$ の表層施用である。コムギは、基肥として窒素7、リン酸5、カリウム7.5  $\text{gm}^{-2}$ の全層施用、穂肥は窒素4.2、リン酸3、カリウム3.9  $\text{gm}^{-2}$ の表層施用である。ダイズは、肥料無施用である。コムギの収穫は、6月4日前後、ダイズの収穫は、10月29日前後である。コムギとダイズの収穫残渣は全量そのまま土壌中へすきこまれている。

本研究では、各調査圃場に設置した窒素無施肥区（約100 m<sup>2</sup>）において各調査を実施した。ただし、収量調査は、窒素無施肥区と慣行施肥区において実施した。試験区は、試験実施期間の4年間同一場所に設置した。リン酸、カリウムは各区とも慣行量を施用し、その他の耕種概要と生物季節は第2表に示す通りである。4ヵ年とも同一の農家が全ての調査圃場の管理を行った。大西地区での集落営農の技術は、作目・品種と作期の統一、雑草と病害虫の一斉防除、一部農業機械の共同利用、農作業の受委託およびJAカントリーの利用である。



第1図 大西地区における輪換田の配置と調査圃場との関係。

第1表 水稻生育期間中の平均気温と積算降水量、水稻作付け前の水熱係数および作付け順序。

年次	平均気温 (°C)	積算降水量 (mm)	水熱係数 (mm°C <sup>-1</sup> ・day <sup>-1</sup> )	作付け順序		
				輪換田A	輪換田B	一毛作田
2000	26.2	478	2.2	コムギ・ダイズ	水稻	水稻
2001	25.3	527	3.0	水稻	コムギ・ダイズ	水稻
2002	25.4	337	1.9	コムギ・ダイズ	水稻	水稻
2003	24.5	553	5.5	水稻	コムギ・ダイズ	水稻

水熱係数=10×ΣPr/ΣT10 Pr:降水量, T10:日平均気温が10°C以上の日の気温。

積算期間は、調査年の前年11月から当年5月まで。

第2表 移植日、栽植密度および生物季節.

	移植日	栽植密度(株 $m^{-2}$ )	最高分げつ期	出穂期	成熟期
2000	6/10	20.0	7/13 (33)	8/28 (79)	10/1 (113)
2001	6/19	18.4	7/26 (37)	8/27 (69)	10/11 (114)
2002	6/13	20.3	7/20 (37)	8/23 (71)	10/8 (117)
2003	6/23	15.7	7/15 (22)	8/26 (64)	10/19 (109)

( )内は移植後日数を示す.

## 2. 土壌の採取と分析

土壌試料は、毎年代かき前に試験区当たり3ヶ所の作土(0~15 cm)を約1 kg 混合採取し同時に作土深と仮比重を測定した. 土壌特性値として全窒素 (T-N), 全炭素 (T-C), 可給態窒素量および土壌窒素無機化量を測定した. T-C および T-N は, 土壌を2 mm の篩を通し風乾し, さらに微粉砕した土壌約5 mg を Tracer MAT (thermo Quest, Tokyo) を用いて3反復で測定した. 可給態窒素量(mg 乾土 100 g $^{-1}$ )は, 2 mm の篩に通した風乾土壌 10 g を 30°C, 4 週間3 反復で湛水培養し, 培養期間中に発現した窒素量を乾土 100 g 当たりで表示した. 移植から最高分げつ期, 出穂期または成熟期までの各生育期間中に発現した乾土 100 g 当たりの土壌窒素無機化量 (mg 乾土 100 g $^{-1}$ ) は, 2 mm の篩に通した未風乾土壌 10 g を 30°C で最長 10 週間まで3 反復で湛水培養し, 各生育期までの有効積算地温を使用して次式(1)に示した有効積算温度法(吉野・出井 1977)によって求めた.

$$y = k \times D^n. \quad (式 1)$$

ただし,  $y$ : 各生育期までの土壌窒素無機化量,  $D$ : 移植から各生育期までの有効積算地温(基準地温は 15°C),  $k$ : 土壌の窒素放出量に関する係数,  $n$ : アンモニア態窒素の生成型を表す次数である.  $k$  と  $n$  はシンプレックス法により推定した.

各生育期間中に発現した土地面積当たりの土壌からの窒素発現量は, 各生育期間中の土壌窒素無機化量と土壌の仮比重および作土深から算出し, 土壌窒素無機化発現量(gm $^{-2}$ )と定義した. 試験期間中の地温は, 各区2ヶ所に地温計おんどとり Jr. (T & D, Nagano) を作土層に設置して測定した. 土壌窒素吸収率は, 各生育期までの土壌窒素無機化発現量に対する各生育期における窒素保有量の割合とした.

## 3. 水稻試料の採取と分析

水稻試料の採取は, 出穂期と成熟期に試験区当たり3地点より各6株の水稻地上部を刈り取り採取し, 80°C で72 時間通風乾燥し乾物重を求めた. 乾燥試料は粉碎し, ケルダール法によって窒素含有量を求めた. 成熟期に試験区当たり2ヶ所から12~20 株採取し収量および収量構成要素を求めた.

## 4. 気象データ

日平均気温および降水量は, 圃場近くに設置した気象観測装置(CR10X, Campbell Science Inc.)で測定した. 各調査年の前年11月から当年5月までの降水量と平均気温を用いて水熱係数(10×積算降水量/日平均気温が10°C以上の日の積算気温)を算出した.

## 結 果

### 1. 気象および生育・収量の概況

第1表に2000年から2003年における水稻栽培期間中の平均気温および積算降水量を示した. 2000年は, 水稻生育期間中の降水量が478 mm, 平均気温26.2°Cと試験期間中では少雨・高温の年となった. 2001年は, 7, 8月の最高気温が調査期間中の最高値(37.0°C, 38.1°C)を示した. 2002年は, 7月下旬の平均気温が29.2°Cと高くなり, 降水量は8・9月に多雨になったものの生育期間の積算降水量は337 mmと少雨となった. 2003年は, 平均気温が24.5°Cと4ヶ年中最も低くなったが8月下旬以降気温が上昇した. 水稻の生育は, 2000年から2002年は多少の変動はあるものの概ね順調に推移した. 2003年は全国的に冷夏となり水稻生育がやや停滞したものの, 出穂期以降の天候が回復しその後は順調に推移した.

第3表に2000年から2003年における窒素無施肥区および窒素慣行施肥区における収量および収量構成要素を示した. 窒素無施肥区では, 輪換田水稻は一毛作田と比較して, 4年間を通じてm $^2$ 当たり穂数は同程度であるが1穂穎花数が増える傾向が認められた. そして, 輪換田水稻の登熟歩合が一毛作田と比較してほぼ同じか, やや低下する傾向がみられたが, 輪換田水稻の収量は一毛作田に比較して高くなる傾向であった. これらのことから, 輪換田水稻での増収は, 1穂穎花数の増加と, 増加した穎花数に比較して相対的に高い登熟歩合に起因すると考えられた. 窒素慣行施肥区では, 一毛作田に比較して輪換田の穎花数が増えたが, 輪換田では総穎花数の増加に伴って登熟歩合が低下し減収した. また, 輪換田, 一毛作田ともに, 窒素無施肥区に比較して窒素施肥区で総穎花数が増加し, 窒素施肥区で登熟歩合が低下した. 以上のことから, 窒素無施肥区における水稻生育が窒素の供給制限を受け, 窒素施肥区では光供給の制限を受けていると考えられた.



第3表 年次と土地利用別にみた収量および収量構成要素.

## a. 窒素無施肥区

年次(ブロック)	穂数(本 $m^{-2}$ )		1穂穎花数(個)		登熟歩合(%)		千粒重(g)		精玄米重(g $m^{-2}$ )	
	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田
2000(B)	328 $\pm$ 17	352 $\pm$ 22	74.9 $\pm$ 2.8	69.9 $\pm$ 8.0	85.2 $\pm$ 0.1	85.8 $\pm$ 2.1	23.9 $\pm$ 0.1	23.6 $\pm$ 0.2	500 $\pm$ 11	496 $\pm$ 26
2001(A)	310 $\pm$ 0	310 $\pm$ 30	74.3 $\pm$ 0.4	68.3 $\pm$ 7.3	84.3 $\pm$ 3.6	86.6 $\pm$ 1.0	23.7 $\pm$ 0.1	22.1 $\pm$ 0.3	432 $\pm$ 14	403 $\pm$ 14
2002(B)	396 $\pm$ 0	351 $\pm$ 61	72.6 $\pm$ 0.8	64.3 $\pm$ 3.7	85.3 $\pm$ 1.9	89.0 $\pm$ 2.9	22.3 $\pm$ 0.5	22.0 $\pm$ 0.1	548 $\pm$ 34	438 $\pm$ 39
2003(A)	308 $\pm$ 11	285 $\pm$ 46	83.8 $\pm$ 5.0	80.0 $\pm$ 17.7	92.9 $\pm$ 0.2	95.6 $\pm$ 2.0	22.8 $\pm$ 0.1	23.3 $\pm$ 0.6	548 $\pm$ 56	498 $\pm$ 32

表中の数値は平均値 $\pm$ 標準偏差を示す.

## b. 窒素慣行施肥区

年次(ブロック)	穂数(本 $m^{-2}$ )		1穂穎花数(個)		登熟歩合(%)		千粒重(g)		精玄米重(g $m^{-2}$ )	
	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田	輪換田	一毛作田
2000(B)	400 $\pm$ 31	380 $\pm$ 15	80.2 $\pm$ 7.7	76.8 $\pm$ 8.8	81.3 $\pm$ 2.8	83.6 $\pm$ 6.4	24.8 $\pm$ 0.0	24.8 $\pm$ 0.4	643 $\pm$ 10	601 $\pm$ 19
2001(A)	344 $\pm$ 33	343 $\pm$ 9	74.7 $\pm$ 4.2	71.9 $\pm$ 0.8	76.7 $\pm$ 1.6	84.6 $\pm$ 1.9	22.5 $\pm$ 0.1	22.8 $\pm$ 1.1	444 $\pm$ 57	474 $\pm$ 2
2002(B)	425 $\pm$ 45	409 $\pm$ 44	83.3 $\pm$ 1.1	75.8 $\pm$ 4.6	67.8 $\pm$ 8.6	82.6 $\pm$ 2.4	21.6 $\pm$ 0.8	22.7 $\pm$ 0.1	514 $\pm$ 42	579 $\pm$ 71
2003(A)	338 $\pm$ 8	347 $\pm$ 13	91.4 $\pm$ 0.8	86.0 $\pm$ 5.9	84.5 $\pm$ 0.6	89.6 $\pm$ 3.3	23.9 $\pm$ 0.3	23.5 $\pm$ 0.7	623 $\pm$ 5	624 $\pm$ 17

表中の数値は平均値 $\pm$ 標準偏差を示す.

第4表 土地利用別にみた土壌化学性(2000~2003)

	輪換田A	一毛作田(01,03)	輪換田B	一毛作田(00,02)
T-N(%)	0.13 $\pm$ 0.0	0.15 $\pm$ 0.0	0.15 $\pm$ 0.0	0.16 $\pm$ 0.1
T-C(%)	1.31 $\pm$ 0.1	1.65 $\pm$ 0.1	1.67 $\pm$ 0.0 <sup>c</sup>	1.75 $\pm$ 0.2
可給態窒素(mg100g乾土 <sup>-1</sup> )	7.65 $\pm$ 4.2	9.49 $\pm$ 5.6	10.24 $\pm$ 2.7	10.04 $\pm$ 0.9
土壌窒素無機化量(mg100g乾土 <sup>-1</sup> )				
最高分げつ期	3.37 $\pm$ 0.1	3.46 $\pm$ 0.3	3.79 $\pm$ 0.6	6.23 $\pm$ 0.6
出穂期	4.48 $\pm$ 0.9	5.03 $\pm$ 0.6	7.05 $\pm$ 0.5 <sup>ab</sup>	10.59 $\pm$ 0.5
成熟期	5.07 $\pm$ 1.2	5.92 $\pm$ 1.0	8.67 $\pm$ 1.1	12.59 $\pm$ 0.6

表中の数値は2000~2003の平均値 $\pm$ 標準偏差を示す.

a: 輪換田Bと一毛作田(00,02)に1%水準で有意差があることを示す.

b: 輪換田Bと一毛作田(00,02)を込みにして2000年と2002年との間に1%水準で有意差があることを示す.

c: 輪換田Aと輪換田Bとの間に5%水準で有意差があることを示す.

## 2. 調査圃場の土壌理化学性

第4表に2000年から2003年におけるT-N, T-C, 可給態窒素量(mg乾土100g<sup>-1</sup>)の平均値および移植から最高分げつ期, 出穂期および成熟期までの各生育期間における土壌窒素無機化量(mg乾土100g<sup>-1</sup>)の平均値を示した. T-N, T-Cは, 輪換田A・Bともに一毛作田に比較して低い傾向がみられた. 可給態窒素量は, 輪換田Aにおいて一毛作田(01, 03)に比較してやや低い傾向を示し, 輪換田Bは一毛作田(00, 02)と同程度となった. 土壌窒素無機化量は, 最高分げつ期, 出穂期, 成熟期ともに一毛作田(01, 03)に比較して輪換田Aが同程度であったが, 一毛作田(00, 02)に比較して輪換田Bが低くなった. 以上のようにより, 輪換田において一般的にみられる乾土効果の1要素である土壌からの窒素発現量の増大が, それぞれ対応する一毛作田と比較して輪換田Aおよび輪換田Bにおいて認められなかった. そして, T-N, T-Cは輪換田Bに比較して輪換田Aで低く, T-Cは輪換田間で有意な差(危険率5%)となった. T-N, T-Cに影響される可給態窒素量と各生育時期の土壌窒素無機化量は輪換田Bに比較して輪換田Aで低くなった. 同一圃場である一毛作田(01, 03)と一毛作

田(00, 02)のT-N, T-Cは同程度であったが, 各生育時期の土壌窒素無機化量は一毛作田(00, 02)に比較して, 一毛作田(01, 03)で低くなった. これは, 一毛作田がブロックAに属しているため, 一毛作田(01, 03)の周辺圃場が前年秋から当年春まで休閑であるのに対し, 一毛作田(00, 02)の周辺圃場が前年秋から当年春までコムギであることが関与していると考えられた. すなわち, 一毛作田(00, 02)の土壌は周辺圃場の影響を受けてよく乾燥したために, 高い土壌窒素無機化量を発現したのに対して, 一毛作田(01, 03)では土壌水分が高く一毛作田(00, 02)の様な土壌窒素無機化量が得られなかったと考えられた. また, 土壌の乾燥程度を示す指標の一つとされている水熱係数は, 一毛作田(01, 03)と輪換田Aに対応する2001年と2003年の値が, 一毛作田(00, 02)と輪換田Bに対応する2000年と2002年の値より高い(第1表). このように, 土壌窒素無機化量の発現は水稻栽培前の気象条件にも影響され, 輪換田間差の一因となっていると考えられた.

## 3. 水稻による窒素吸収

各生育期における輪換田と一毛作田の窒素保有量

第5表 土地利用別にみた地上部窒素保有量、土壌窒素無機化発現量および窒素吸収率(2000～2003)

	輪換田A			一毛作田(01, 03)			輪換田B			一毛作田(00, 02)		
	2001	2003	平均	2001	2003	平均	2000	2002	平均	2000	2002	平均
窒素保有量(gm <sup>-2</sup> )												
最高分げつ期	3.4±0.5	4.9±1.3	4.1±1.1	2.7±0.7	5.3±1.4	4.0±1.8	3.0±0.2	1.7±0.2	2.3±0.9 <sup>bc</sup>	2.5±0.3	1.0±0.0	1.8±1.0
出穂期	7.7±0.3	8.8±1.1	8.2±0.8	6.4±0.9	9.3±1.3	7.8±2.0	8.3±0.3	8.1±1.9	8.2±0.1 <sup>a</sup>	6.3±0.3	6.3±0.3	6.3±0.0
成熟期	9.9±5.6	11.8±1.7	10.9±1.3	6.6±0.2	9.7±0.8	8.1±2.2	11.0±0.9	9.1±1.1	10.0±1.3	8.2±0.0	7.9±0.6	8.0±0.3
土壌窒素無機化発現量(gm <sup>-2</sup> )												
最高分げつ期	4.4±0.2	5.6±0.2	5.0±0.8	4.8±0.7	4.7±0.7	4.7±0.0	5.1±0.2	8.9±2.0	7.0±2.6	8.4±1.2	11.3±3.5	9.8±2.0
出穂期	5.4±0.6	8.2±0.8	6.8±2.0	6.0±0.6	7.9±0.7	7.0±1.3	12.7±0.2	12.9±3.7	12.8±0.2 <sup>a</sup>	16.4±1.1	17.2±1.5	16.8±0.6
成熟期	6.1±0.8	9.6±1.3	7.8±2.5	6.8±0.6	9.7±0.9	8.2±2.1	16.1±0.5	15.2±4.6	15.6±0.6	19.7±1.2	20.5±0.7	20.1±0.6
窒素吸収率												
最高分げつ期	0.8±0.1	0.9±0.3	0.8±0.1	0.6±0.1	1.1±0.4	0.8±0.4	0.6±0.0	0.2±0.0	0.4±0.3	0.3±0.0	0.1±0.0	0.2±0.1
出穂期	1.5±0.1	0.9±0.2	1.2±0.2	1.2±0.0	1.3±0.3	1.1±0.1	0.7±0.0	0.7±0.2	0.6±0.0 <sup>a</sup>	0.4±0.0	0.4±0.0	0.4±0.0
成熟期	1.9±1.0	1.2±0.0	1.4±0.3	1.0±0.1	1.0±0.2	1.0±0.0	0.7±0.1	0.7±0.3	0.6±0.1 <sup>a</sup>	0.4±0.0	0.4±0.0	0.4±0.0

表中の数値は平均値±標準偏差を示す。

a: 輪換田Bと一毛作田(00,02)に5%水準で有意差があることを示す。

b: 輪換田Bと一毛作田(00,02)を込みにして2000年と2002年との間に5%水準で有意差があることを示す。

c: 輪換田Aと輪換田Bとの間に5%水準で有意差があることを示す。

(gm<sup>-2</sup>), 土壌窒素無機化発現量 (gm<sup>-2</sup>) および土壌窒素吸収率を第5表に示した。各生育期における輪換田の窒素保有量は、最高分げつ期において一毛作田と同程度であるが、出穂期および成熟期において一毛作田より高くなる傾向を示し、一毛作田(00, 02)に比較して輪換田Bにおいて有意に高くなった。各生育期における土壌窒素無機化発現量は、輪換田Aにおいて一毛作田(01, 03)と同程度となったが、輪換田Bの土壌窒素無機化発現量は一毛作田(00, 02)に比較して最高分げつ期において低くなる傾向を示し、出穂期と成熟期において低くなった。輪換田A、Bの土壌窒素吸収率は、最高分げつ期において一毛作田と同程度であったが、出穂期と成熟期において一毛作田(01, 03), (00, 02)に比較して高くなる傾向を示し、輪換田Bが一毛作田(00, 02)に比較して顕著に高くなった。輪換田Aと輪換田Bとの比較では、最高分げつ期における輪換田Aの窒素保有量が輪換田Bに対して有意(危険率5%)に高くなり、出穂期以降は同程度となった。土壌窒素無機化発現量は、輪換田Bが輪換田Aに対して高くなる傾向が認められ、窒素吸収率は、輪換田Aが輪換田Bに対して高くなる傾向が認められた。

以上のことから、輪換田水稻において出穂期および成熟期の窒素保有量が対応する一毛作田より高くなる傾向が認められ、その原因は土壌窒素無機化発現量ではなく、輪換田水稻における出穂期と成熟期の窒素吸収率の向上であると考えられた。そして、これらの関係は輪換田Bで顕著に認められた。

#### 4. 土地利用、年次間の分散分析

第4表に、土壌化学性についてブロック別にみた土地利用と年次間の分散分析結果を示した。Aブロックは、土地利用および年次間で土壌化学性に有意差が認められなかった。Bブロックでは、出穂期の土壌窒素無機化量においてのみ輪換田と一毛作田との間および年次間で有意差(危険率1%)が認められ、他の土壌化学性に有意差が認められ

なかった。第5表には、水稻による窒素吸収動態(窒素保有量、窒素吸収率)および土壌窒素無機化発現量の土地利用および年次間差について示した。Aブロックでは各生育期における窒素保有量、土壌窒素無機化発現量および土壌窒素吸収率についての土地利用および年次間に有意差は認められず、出穂期の窒素吸収率に輪換田と一毛作田間について有意差(危険率5%)が認められた。Bブロックでは、輪換田一毛作田との間で出穂期の窒素保有量、窒素無機化発現量および窒素吸収率に有意差(危険率5%)が認められ、最高分げつ期の窒素保有量に年次間で有意差(危険率5%)が認められた。

## 考 察

### 1. 輪換田と一毛作田土壌からの窒素発現および水稻による吸収

本研究では、土壌窒素無機化発現量が輪換田Aと一毛作田(01, 03)で同程度となり、輪換田Bは一毛作田(00, 02)に比較して低く推移した。このように、輪換田土壌からの窒素発現量が対応する一毛作田に比較して増加しない現象が確認された。そして、輪換田水稻の窒素吸収量が対応する一毛作田に比較して高くなる時期が出穂期以降であることが確認された。これらの原因を明らかにするために、窒素無施用下における水稻による窒素吸収量を、土壌からの窒素発現量とその吸収率の2要因に分離して考察を進める。

土壌からの窒素発現量が一毛作田土壌に比較して輪換田土壌で高くなる研究結果(西天・山室1988, 狩野ら1991, 金田ら1989a, b), 輪換田と一毛作田間における窒素発現量の多寡の順序関係が年によって異なる研究結果(市田・遊坐1982), 土壌窒素無機化量が両者間で生育初期において同程度となるが成熟期には一毛作田に比較して輪換田において増加する研究結果(廣川ら1995)など異なる結果が報告されている。廣川ら(1995)は一毛作田と比較して高くなる輪換田における土壌窒素無機化量は、一毛作田と輪

第6表 各生育期における土壌窒素無機化量と  
T-NおよびT-Cとの相関関係.

	最高分げつ期	出穂期	成熟期
T-N	0.58*	0.31	0.28
T-C	0.55*	0.48*	0.47*

\*は、有意(5%水準)であることを示す.

換田における土壌中の有機物の質と集積条件の差異や土壌団粒構造の違いに起因すると推察している. さらに, 土壌窒素無機化量は土壌の粘土含量, 陽イオン交換容量, 全窒素, リン酸吸収係数および pH 等の土壌理化学性との間に高い相関関係が確認されている (廣川ら 1995, 吉野・出井 1977).

本研究では田畑輪換田と一毛作田において, T-C と最高分げつ期, 出穂期, 成熟期における土壌窒素無機化量との間に有意な相関関係が, T-N と最高分げつ期の土壌窒素無機化量との間に有意な相関関係が認められた (第6表). 本試験地の田畑輪換田では, 水田と畑, すなわち土壌の還元と酸化が1年ごとに繰り返される. そのため, 一毛作田に比較して輪換田では土壌有機物の消耗が激しく (西天・山室 1988, 種田ら 1992), 輪換田の T-C, T-N が一毛作田に比較して低くなる傾向 (第4表) が認められたと推察される. すなわち, 本試験地では輪換を実施することで増加すると考えられる田畑輪換田土壌からの窒素発現量の増加の程度は, T-C や T-N に支配されて高くなった一毛作田の土壌からの窒素発現量に比較して相対的に低くなり, さらに輪換田 B では対応する一毛作田の周辺圃場の冬期排水が一毛作田の乾土効果を助長することで, 乾土効果の一要因である輪換田における土壌窒素無機化量の増加が一毛作田に比較して認められなかったと考えられる.

一般に, 輪換田水稻による土壌から発現した窒素の吸収率は, 一毛作田に比較して高い (狩野ら 1991, 廣川ら 1995). その原因のひとつとして, 狩野ら (1991) は輪換田水稻の根域が一毛作田水稻と比較して下層土までよく発達することで, 下層土の窒素を効率よく吸収することを指摘している. 市田・遊坐 (1982) は, 輪換初年目の水稻の根の活性 (田植え後 10 日目) が一毛作田水稻の 130%~139% となり, 平均根長, 根数および総根長ともに輪換田水稻が一毛作田水稻と比較して高くなるとしている. 本研究でも, 輪換田土壌から発現した窒素の水稻による出穂期以降の吸収率は, 対応する一毛作田に比較して高く, 輪換田水稻の根域が一毛作田水稻と比較して出穂期以降に拡大していることが示唆された. しかし, 本研究の輪換田 A と一毛作田 (01, 03) において土壌窒素吸収率が 100% 近い, 100% を超えていた. 水田土壌ではなく畑土壌培養ではあるが, 圃場の地温変化に連動した変温培養と一定の温度条件下の培養では, 同じ培養積算地温であっても変温培養において多くの窒素が土壌から発現する (Lynne ら 2000). そして, 輪換田 A と一毛作田 (01, 03) の水熱係数は高く,

湛水培養で推定したこれらの土壌の土壌窒素無機化量は低くなると考えられる. これらのことから, 本研究で用いた一定温度条件下の湛水培養による土壌窒素発現量の推定が, 輪換田 A と一毛作田 (01, 03) における実際の窒素発現量を過少評価し, 土壌吸収率を過大評価している可能性がある.

以上のことに加え, 輪換田において登熟歩合の低下による収量減少が認められるため (第3表), 輪換田水稻では出穂期以降において高くなる土壌窒素吸収率に応じた栽培管理, 特に穂肥管理を行うべきであると考えられた. また, 水熱係数から土壌窒素発現量の年次間 (00, 02 と 01, 03) の差異が示唆されたため, 冬期気象条件を考慮した施肥管理が必要であると考えられた.

## 2. 窒素吸収動態における土地利用間と年次間差

水稻の栽培年次が異なる A ブロックと B ブロックそれぞれにおける窒素保有量および土壌窒素無機化発現量について輪換田と対応する一毛作田との間差 (土地利用間差) および年次間差について考察を進める. B ブロックの輪換田とそれに対応する一毛作田を込みにして最高分げつ期の窒素保有量に年次間差が認められたものの, 両ブロックにおける土壌窒素無機化発現量とその窒素保有量は年次間で安定しており, 2 年間の比較ではあるものの調査期間において気象などの年次により変化する要因に大きな影響を受けていないと考えられた (第5表). B ブロックの輪換田と対応する一毛作田では年次を込みにして出穂期の窒素吸収動態 (窒素保有量と土壌窒素無機化発現量) に土地利用間で有意な差が認められた. 調査対象である大西集落営農では, 現在, 輪換田と一毛作田に対して同一の窒素施肥管理がなされているが, 輪換田 B と一毛作田 (00, 02) では窒素施肥に関して異なる管理の必要性が考えられた. 一方, A ブロックでは土地利用間と年次間において窒素の吸収動態に有意な差が認められないが, 窒素保有量が一毛作田に対して輪換田で高くなっており, 集落営農を行う上で A ブロックにおいても, 輪換田と一毛作田では窒素施肥に関して異なる管理が必要であると考えられた.

## 3. 窒素吸収動態のブロック間差

土壌からの窒素発現および水稻による窒素吸収を輪換田 A と輪換田 B で比較すると, 土壌窒素無機化量および土壌窒素無機化発現量は輪換田 B が輪換田 A に対して高くなる傾向がみられた (第4表). 輪換田 A と輪換田 B とで, 土壌からの窒素発現に異なる傾向が見られる原因として前述した水熱係数から推測される水稻栽培前土壌の乾燥程度の違いなどの年次変動と土壌化学性の違いが考えられる. 一般的に, 土壌からの窒素発現量と土壌化学性, 例えば T-N, T-C, CEC, リン酸吸収係数および粘土含量との間には, 正の相関関係がある (廣川ら 1995). 輪換田 A と輪換田 B では, T-C に有意差が認められた. 本試験では,



土壌の乾燥状態に影響する前作期間中の気象条件等による年次変動とともに、土壌化学性のような圃場固有の要因による輪換田間差が存在すると考えられた。また、輪換田 A の窒素保有量は最高分けつ期には輪換田 B と比較して有意に高くなり、出穂期以降は同程度となった。このことから、ブロック間において水稻の窒素吸収特性が異なる可能性が示唆された。

以上のことから、同じ集落内の輪換田であっても、ブロック単位で土壌化学性や水稻栽培前の気象条件によって土壌からの窒素発現が異なり、またブロック間で水稻の生育特性が異なり、水稻の窒素吸収量に影響を与えていることが示唆された。同一ブロック内の圃場間差については、本研究では明らかにすることができなかったが、土壌中の有機物の質とその集積条件や団粒構造に支配されていると推察(廣川ら 1995) されていることから、更に研究考察を進める必要があると考えられる。今後、土壌化学性の圃場間変異を集落全域で明らかにし、窒素発現や水稻の窒素吸収に影響を与える土壌の化学性のブロック間およびブロック内の圃場間変異に基づいた土壌改良や水稻の窒素施肥管理を行うことができれば、窒素発現と水稻の窒素吸収のブロック間およびブロック内変異を最小に抑えた水稻栽培につながると考えられる。

**謝辞:** 本研究を進めるにあたって、福田勝美氏には圃場の提供と試験区の栽培管理で多大なご協力をいただいた。また奈良県農業技術センターの方々には、水稻試料の調整で便宜をはかっていただいた。ここに記して謝意を表する。

## 引用文献

- 廣川智子・伊藤純雄・北川康夫 1995. 良質米栽培時の土壌窒素・施肥窒素の動態と施肥技術. 富山県農業技術センター研究報告 15 : 1-64.
- 市田俊一・遊坐次夫 1982. 地力培養による田畑輪換水田の収量性について. 青森農試研報 26 : 139-160.
- Inamura, T., H. Hamada, K. Iida and M. Umeda 2003. Correlation of the amount of nitrogen accumulated in the aboveground biomass at panicle initiation and nitrogen content of soil with the nitrogen uptake by lowland rice during the period from panicle initiation to heading. *Plant Prod. Sci.* 6 : 302-308.
- Inamura, T., K. Goto, M. Iida, K. Nonami, H. Inoue and M. Umeda 2004. Geostatistical analysis of yield, soil properties and crop management practices in paddy rice field. *Plant Prod. Sci.* 7 : 230-239.
- 上郷千春 1953. 田畑輪換田の水稻の生育と養分吸収. 農業技術 8 : 285-286.
- 金田吉弘・児玉徹・長野間宏 1989a. 八郎潟干拓地の輪換水田における窒素吸収パターンの特徴. 土肥誌 60 : 127-133.
- 金田吉弘・児玉徹・長野間宏 1989b. 輪換水田における水稻の下層土からの窒素吸収量の評価を無機化窒素量の推定. 土肥誌 60 : 399-405.
- 狩野幹夫・加藤弘道・酒井一・小川吉雄・笠井良雄・石原正敏 1991. 輪換田水稻の栽培法に関する研究. 第 1 報 輪換田水稻の生理生態的特性と窒素の施肥法. 茨城県農試研報 31 : 41-75.
- 北田敬宇・下田英雄・亀川健一・秋山豊 1993. 灰色低地土水田における田畑輪換による土壌養分動態と最適な水田・畑期間. 土肥誌 64 : 154-160.
- Lynne, C.-B., Joseph L. Pikul Jr., Merle F. Vigil and Walter E. Riedell 2000. Soil nitrogen mineralization influenced by crop rotation and nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 : 2038-2045.
- 松村修 2001. 田畑輪換技術の開発とその問題点. 日作紀 70 (別 2) : 377-382.
- 宮本誠 1994. 奈良盆地の水士史. 農山漁村文化協会, 東京. 22-26.
- 西天浩・山室成一 1988. 低湿重粘土水田における田畑輪換土壌中における窒素の動向と作物による吸収. 農業技術 43 : 385-389.
- 斉藤光夫 1957. 奈良県における田畑輪換栽培. 農と園 32 : 184-188.
- 高橋明広 2003. 多様な農家・組織間の連携と集落営農の発展—重層的主体関係構築の視点から—. 農林統計協会, 東京. 5-8.
- 種田貞義・田村貞浩・萩原正次 1992. 畑転換時の作物の種類及び畑転換の期間が輪換田水稻の生育・収量に及ぼす影響. 新潟県農試研報 38 : 41-52.
- 鳥山和伸 1990. 水田土壌の窒素無機化と施肥. 日本土壌肥科学会会偏. 博友社, 東京. 131-137.
- 吉野喬・出井嘉光 1977. 土壌窒素供給力の有効積算温度報による推定法について. 農事試研報 25 : 1-62.

**Yearly and Field Variations of Paddy-Upland Rotational Fields in Nitrogen Mineralization and Nitrogen Absorption by Rice in Paddy-Upland Rotational Field — A Case Study in the Nara Basin for Four Years —** : Sachiko IKENAGA, Nika MATSUMOTO, Hiromi INOUE, Tatsuya INAMURA (*Grad. School of Agric, Kyoto Univ. Kyoto 606-8502, Japan*)

**Abstract :** Soil nitrogen mineralization and nitrogen absorptions by rice in paddy-upland rotational fields (rice-wheat-soybean) were studied in the Nara basin for four years (2000-2003) in comparison with those in adjacent single-cropped paddy fields. Under conditions of no nitrogen fertilization, the crop rotational fields did not increase soil nitrogen mineralization owing to decrease of total nitrogen and carbon in the soils by repeated crop rotations. However, rice at the heading and maturity stages had higher nitrogen absorptivity and higher nitrogen content in the rotational fields than in the single-cropped paddy fields, resulting in a larger number of spikelets per panicle and higher yield in the crop-rotational fields. Soil nitrogen mineralization of a paddy-upland rotational field did not vary with the year, but largely varied with the field due to physicochemical properties of their soils. The difference in the soil properties between single cropped and crop rotational fields may be minimized by supplying a nitrogen source such as organic manure to the latter.

**Key words :** Nitrogen, Paddy rice, Paddy-upland rotation, Single crop, Soil Nitrogen mineralization.