

田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壌肥沃度の変化

誌名	東北農業研究センター研究報告
ISSN	13473379
著者名	住田,弘一 加藤,直人 西田,瑞彦
発行元	東北農業研究センター
巻/号	103号
巻号補足	
掲載ページ	p. 39-52
発行年月	2005年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の 生産力低下と土壌肥沃度の変化^{*1)}

住田 弘一^{*2)}・加藤 直人^{*3)}・西田 瑞彦^{*3)}

抄 録： 田畑輪換を繰り返しつつ、持続的に作物を安定生産できるかどうかは、水田輪作営農を推進していく上で政策的にも極めて重要な問題であり、長期的視点から作物生産力を評価する必要がある。そこで、有機質資材の投入管理を組み合わせた長期的な畑転換や田畑輪換を繰り返したほ場において、土壌肥沃度や転作大豆及び復元田水稻の生産力の変化を調べた。寒冷地において、水稻と大豆による田畑輪換を畑期間が過半を占める体系で10年以上繰り返すと、土壌の可給態窒素が大きく減耗する。この可給態窒素の減耗は、畑期間が1～2年の田畑輪換の場合には、600 kg / 10aの稲わらを毎年投入することにより軽減される。しかし、畑期間が過半を占める場合には稲わら施用の効果がみられない。長期にわたり大豆を連作すると、田畑輪換の場合より可給態窒素の減耗が激しく、稲わら堆肥を2トン / 10a連用しても、連年水田の堆肥無施用の場合を大きく下回る。このような可給態窒素の減耗に伴って、田畑輪換の繰り返しや長期畑転換における大豆の収量は、十分な水田期間を確保した輪換畑に比べ10～20%減収する。一方、復元田の水稻は、田畑輪換の繰り返しや長期畑転換を経ても、連年水田に比べて増収する。

キーワード： 田畑輪換, 大豆, 水稻, 可給態窒素, 有機質資材

Depletion of soil fertility and crop productivity in succession of paddy rice-soybean rotation :

Hirokazu SUMIDA^{*2)}, Naoto KATO^{*3)}, and Mizuhiko NISHIDA^{*3)}

Abstract : To promote paddy-upland (irrigated paddy rice and upland crop) rotation farming, sustainability of crop production in the successive rotation system should be investigated from a long term view. The changes in soil nitrogen fertility, soybean productivity, and paddy rice productivity were investigated by long-term field experiments in paddy-upland rotation in combination with different paddy/upland periods and organic material application in gray lowland soil in the cold-temperate region of Japan (NARCT, Omagari, Akita). When a paddy-upland rotation cultivating paddy rice and soybean in a cycle of 3-4 years upland and 1-2 years paddy (medium-term upland rotation) was continued for ten years or more, the available nitrogen in soil decreased greatly. Although the depletion of available soil nitrogen was mitigated by rice straw application at six tons per hectare in the case of short-term upland rotation (paddy-upland rotation in a cycle of 1-2 years upland and 1-3 years paddy), it was not mitigated by rice straw application in the medium-term upland rotation. Cultivating soybean for eighteen years on upland field converted from paddy field (long-term upland conversion) decreased available soil nitrogen more than the paddy-upland rotation did. The available soil nitrogen in the long-term upland conversion, even with application of rice straw compost of twenty tons per hectare, was markedly lower than that in the continuous paddy field without organic material application. In response to the depletion of available soil nitrogen, the yield of soybean on upland fields in the paddy-upland rotation and the long-term upland conversion decreased by ten to twenty percent compared with that in the field where soybean was planted after sufficient paddy period. On the other hand, the yields of paddy rice in the cases of both paddy-upland rotation and

*1) 本研究の一部は、2003年に日本土壌肥科学会神奈川大会及び東北支部大会（秋田）で発表した。

*2) 現・農業・生物系特定産業技術研究機構本部（Headquarters of National Agriculture and Bio-oriented Research Organization, Tsukuba, Ibaraki, 305-8517, Japan）

*3) 東北農業研究センター（National Agricultural Research Center for Tohoku Region, Omagari, Akita, 014-0102, Japan）

2004年9月2日受付, 2005年1月21日受理

reconversion from the long-term upland conversion were higher than that in the continuous paddy field.

Key Words : Paddy-upland rotation, Soybean, Paddy rice, Available soil nitrogen, Organic material

I はじめに

米の生産過剰基調が続く中、30 余年にわたる生産調整が行われている。転作作物の連作により病虫害や雑草害の発生に伴う減収については早くから指摘されており、これに対して、田畑輪換はこれらの連作障害の回避に有効で、水田における持続的な作物生産が可能な形態であるとして、その普及が進められてきた（農林水産省 1987）。

田畑輪換の畑期間と水田期間の組み合わせは、転作作物や復元田水稻の収量の面から、畑期間 2～3 年に対して水田期間は 2～3 年以上は必要とされており（高橋 1983, 花井 1987, 佃 1990）、土壌の養分供給力の面からも同様の畑期間・水田期間が望ましいとされている（北田ら 1993）。また、松村（1992）は暖地の試験事例から、田畑輪換であっても地力の維持に努めることが重要で、それには、水田期間の比率を大きくし、作物残さの還元と十分な耕起深度の確保が有効であるとしている。

しかし、最近、特に西南暖地の生産現場では、田畑輪換や畑期間が 1 年のブロックローテーションといった土地利用を行っても、転作大豆の収量は以前に比べて低減傾向にあり、これは地力低下に伴う減収ではないかと指摘されている。ただ、その真偽は明らかにされていない。田畑輪換を繰り返していく中で安定して持続的に作物を生産できるかどうかは、政策的に水田輪作営農を推進していく上でも極めて重要な問題であり、長期的視点でみた作物生産力を評価する必要がある。

そこで、稲わら堆肥や稲わらの施用を組み合わせ、長期にわたる畑転換や田畑輪換を繰り返してきた汎用水田において、土壌肥沃度や輪換畑（転換畑）大豆及び輪換田（復元田）水稻の生産力の変化を明らかにし、その持続性を確保するための田畑輪換や有機質資材投入管理のあり方の参考にする。

なお、本報告で取り上げた田畑輪換試験及び長期畑転換試験は、それぞれ十数年、二十数年の長期にわたり、水田利用部水田土壌管理研究室（旧東北農業試験場栽培第一部土壌肥料研究室）及び業務科により管理され、膨大なデータが蓄積されてきた。

歴代の関係者に深く感謝する。また、本報告をご校閲いただいた作物研究所の島田信二博士に感謝する。

II 材料と方法

1 供試ほ場の土地利用体系と栽培管理

1) 供試ほ場の土地利用体系と有機質資材投入管理

供試ほ場は、寒冷地積雪地帯に位置する東北農業研究センター水田利用部（大曲キャンパス）構内の沖積土水田（細粒灰色低地土）である。この構内水田土壌には、非アロフェン質の黒色土層が土壌断面の下層に埋没しているが、一部では最上層にこの黒色土層が位置している。試験 A のほ場は作土及び次層とも黒色であり、試験 B のほ場は作土及び次層とも灰色である。土壌の主な理化学性は表 1 に示した。

試験 A は、いわゆる田畑輪換の繰り返しの試験であり、1989 年まで連年、水田として水稻を作付けしてきたあと、1990 年の畑への転換から開始した。その後の輪換畑、輪換田の割付け、すなわち田畑輪換の体系は表 2 に示したとおりで、輪換畑では大豆を、輪換田では水稻を作付けした。田畑輪換の体系は、輪換畑期間が基本的に 1 年（直近は 2 年）と、同じく 3 年（直近は 4 年）があり、以下では、前者を短期畑輪換、後者を中期畑輪換と称する。この 2 つの田畑輪換系列のほかに連年水田系列がある。有機質資材投入管理については、稲わら施用の有無を組み合わせた。したがって、試験 A は、土地利用方式 3 処理と有機質資材投入管理 2 処理の組み合わせによる 6 処理からなり、各処理とも約 1.6a で、反復はない。投入する有機質資材は変則的ではあるが、連年水田との比較の観点から、水稻作、大豆作に関わらず稲わらとし、毎年秋に、水分 15 % 換算で 600kg / 10a 相当の生わらを細断・散布し、直ちに鋤き込んだ。この稲わらの施用量 600kg / 10a は、水稻 600kg / 10a の収量水準で生産される稲わらの量であり、窒素成分で約 3kg / 10a になる。なお、試験開始前年の 1989 年秋には稲わらの施用はなく、1990 年の大豆作では、有機質資材投入管理に差異はない。また、大豆作あとでは、大豆の落葉

については回収できなかったものの、大豆の収穫残さである茎や殻は搬出した。

試験Bでは、表2に示したように1982年から1999年まで18年間にわたる長期の畑転換のあと、水田に3年間復元し、2003年に再び畑転換した。試験Aと同様に、畑期間には大豆を、復田期間には水稻を作付けした。対照として、この間水稻を連年作付けした連年水田がある。有機質資材投入管理は、試験Bを開始する以前の1970年から稲わら堆肥施用の有無(0, 2トン/10a/年)が開始され、試験Bでもそのまま継続した。この稲わら堆肥2トンには約11kgの窒素が含まれており(住田ら2002)、試験Aの稲わら600kgに比べて3倍以上の窒素投入量になる。なお、大豆の収穫残さはそのままほ場に還元した。試験Bは土地利用方式2処理と有機質資材投入管理2処理の組み合わせによる4処理からなり、各処理とも5aで、反復はない。

2) 大豆及び水稻の栽培管理

試験Aにおける大豆は、1990年から1992年にはナンブシロメを、それ以降にはスズカリを作付けした。栽植様式は畦幅75cmに株間18cmの1株2本立てで、7.4株/㎡とした。肥料は硫安(N 1～3kg/10a)、過石(P₂O₅ 8kg/10a)、塩加(K₂O 8kg/10a)を全量基肥で全面全層に施用した。また、2002年には、各処理の一部の区画に被覆尿素肥料(LP40)を開花期に追肥した。追肥窒素量は7kg/10aとした。なお、炭酸カルシウム等の土壤改良資材は施用しなかった。

試験Aにおける輪換田及び連年水田の水稻は、試験期間を通して良食味米品種のあきたこまちを作付けした。栽植密度は24株/㎡とした。肥料は大豆と同じ単肥を用い、基肥として10a当たりN 6kg, P₂O₅ 8kg, K₂O 6kgを全面全層に施用し、幼穂形成期追肥として、N及びK₂O各2kgを表面施用した。

表1 供試ほ場の土壌の主な化学性＊ (乾土 kg 当たり)

土壌の種類	層位 (cm)	pH (H ₂ O)	T-C (g)	T-N (g)	CEC (cmol)	交換性塩基 (cmol)				リン酸 吸収係数
						Ca	Mg	K	Na	
表層黒色 (試験A)	0～13	5.35	31.0 [#]	1.90 [#]	25.9	7.8	2.3	0.1	0.5	1,500
	13～21	—	53.8	2.80	27.6	4.9	1.4	0.1	0.4	1,890
表層灰色 (試験B)	0～13	5.32	20.2 ^{\$}	1.74 ^{\$}	20.0	8.7	2.7	0.1	0.6	1,120
	13～25	5.75	11.6	0.90	19.0	10.1	3.2	0.1	0.8	1,200

注. ＊：1968年5月に採取した土壌の分析値であり、栽培第一部土壤肥料研究室で取りまとめた「土壤肥料に関する試験成績」より抜粋引用。

#：試験Aは、1968年～1987年まで家畜ふん堆肥を連用したほ場(表層黒色)において1990年に開始し、その時点の作土のT-Cは41.3g/kg、T-Nは2.68g/kgに上昇していた。

\$：試験Bは、1970年以降稲わら堆肥施用の有無の処理が継続されたほ場(表層灰色)において1982年に開始され、稲わら堆肥を連用した作土のその時点におけるT-Cは26.3g/kg、T-Nは2.23g/kgに上昇したのに対して、無施用では1968年とほぼ同じ水準(それぞれ19.9, 1.76)であった。

表2 田畑輪換(試験A)及び長期畑転換(試験B)の作付体系

試験	体系名	'81	'82～'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
A	短期畑輪換	R	R 8作	S	R	R	R	S	R	S	R	R	S	R	S	S	R
	中期畑輪換	R	R 8作	S	S	S	R	S	S	S	R	R	S	S	S	S	R
	連年水田	R	R 8作	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
B	長期畑転換	R	S 8作	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	S
	連年水田	R	R 8作	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

注. 試験Aは短期畑輪換、中期畑輪換、及び連年水田から構成され、試験Bは長期畑転換及び連年水田から構成される。Rは水稻、Sは大豆を示す。

一方、試験Bにおける大豆は、18年間の長期畑転換のうち1982年から1992年にはナンブシロメを、1993年から1999年にはスズカリを作付けし、再畑転換した2003年にはスズカリを作付けした。栽植様式は試験Aと同じである。肥料は硫安(N 3kg/10a)、過石(P₂O₅ 10kg/10a)、塩加(K₂O 10kg/10a)とも全量基肥で全面全層に施用(標準施肥区)し、このうち硫安を除いた無窒素区を併設した。また、再畑転換した2003年には、培土期に被覆尿素肥料(LP70, N 7kg/10a)を追肥した培土期追肥区と、基肥に被覆尿素肥料(LPS80, N 7kg/10a)を追加した全量基肥区を併設した。なお、1982年から1990年までは炭酸カルシウムを毎年90~100kg/10a施用したが、1991年以降は施用していない。

試験Bにおける長期畑転換あとの復元田(2000年から2002年)及びその対照の連年水田の水稲は、多収品種のふくひびきを作付けした。栽植密度は24株/m²とした。肥料は単肥(硫安、過石、塩加)を用い、基肥として10a当たりN 7kg, P₂O₅ 7kg, K₂O 7kgを全面全層に施用し、幼穂形成期追肥として、N 3kgを表面施用した(標準施肥区)。ほかに窒素肥料を除いた無窒素区を設けた。

2 供試ほ場の土壌肥沃度及び作物生産力の把握

1) 土壌の窒素肥沃度

試験Aほ場の各処理からは、1991年春、及び1999年から2003年春までの毎年春と秋に作土を採取した。なお、1991年春は田畑輪換を始めて1年後ではあるが、稲わら処理は1991年の春からであり、以下、便宜的に1991年春に採取したものを開始時の土壌とした。一方、試験Bほ場の各処理からは、1982年春と1991年秋、及び1999年秋から2003年春までの毎年春と秋に作土を採取した。

これらの土壌について、2mm目の篩を通過させた風乾土を調製し、湛水培養により生成するアンモニア態窒素の分析試料とした。直径24mm、高さ110mmのガラス瓶に固液比が1:2.5程度になるように土壌と水を入れて湛水状態とし、ゴム栓で密栓して30℃の恒温器内で静置培養した。4週間後に回収し、培養土壌を10%塩化カリウム溶液で1時間振とう抽出した。この抽出液中のアンモニア態窒素をインドフェノール法により定量し、これを可給態窒素とした。培養・抽出操作は2~3連で行なった。

風乾土の一部はメノウの乳鉢で微粉碎し、全炭素、

全窒素の分析試料とした。全炭素、全窒素はCNコーダー(ヤナコMT-700)により求めた。分析は2~3連で行なった。

結果において図中に示した各年次の全炭素、全窒素及び可給態窒素の値は、当該年次の春あるいは前年秋に採取した土壌の分析値であり、両方ある場合はそれらの平均値である。

2) 土壌の物理性

2002年秋に試験Aほ場及びBほ場の各処理から作土の最表層(0~5cm)と中位層(8~13cm)及び鋤床層の各層位について100mLの採土円筒で土壌を採取し、三相分布とpF1.5(砂柱法)及びpF2.7(加圧板法)における孔隙率を求めた。分析は3連で行った。

3) 大豆及び水稲の収量

大豆については、3畦×8株(3.24m²)を2~3か所の部分刈りによる収量調査を実施した。水稲については、3条×約3.7m(約3.3m²)を1~2か所の部分刈りによる収量調査とした。

III 試験結果及び考察

1 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換による作物生産力の変化

1) 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換における大豆の収量

田畑輪換を繰り返した試験Aにおける輪換畑大豆の収量を図1に示した。田畑輪換に伴う収量の趨勢は低下傾向にあるが、品種が1992年以前(ナンブシロメ)と1994年以降(スズカリ)とで異なることや、気象変動の影響を考慮する必要がある。ナンブシロメとスズカリの収量水準については、1992年に試験Bのは場の一面において比較試験を実施し、ほぼ同等という結果を得ている。一方、気象変動の影響については、1995年、2002年は多雨寡照で着莢不足になり低収にとどまった。また、逆に1996年は少雨多照で大粒化し多収となった(住田ら2003)。なお、1994年は稲わら施用を始めてから最初の輪換畑初年目に当たり、稲わら施用区で土壌還元が原因と思われる生育障害が発生し減収となったが、それ以外では、稲わら施用の有無による収量差は小さかった。

長期畑転換の試験Bにおける大豆の収量の推移を図2に示した。1982年に畑転換を開始したが、長期の畑転換に伴う大豆の収量を把握する目的で、ここ

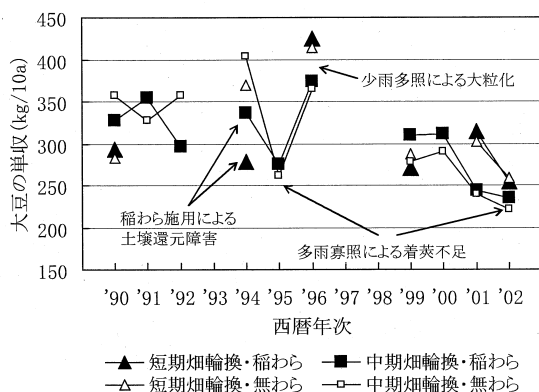


図1 田畑輪換を繰り返した輪換畑大豆の収量 (試験A)

注. 試験開始の1990年には、短期畑輪換と中期畑輪換は同じ前歴であるものの、中期畑輪換、短期畑輪換、連年水田の区割り施工（U字溝を逆さまに敷設）が不十分で、連年水田に隣接した短期畑輪換系列では水田からの伏流水の影響で湿害を強く受け、中期畑輪換系列に比べて低収になった。その後は、明渠を掘るなどの対策を実施した。

稲わら施用は1991年春より開始。

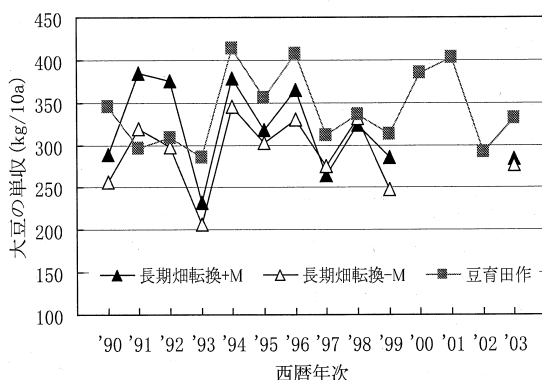


図2 長期畑輪換における転作大豆の収量 (試験B)

注. 窒素施肥の影響が明瞭でなかったため、各プロットは無窒素及び窒素施肥の各区の単純平均値で示した。品種は1990～1992年がナンブシロメ、それ以降はスズカリである。対照として、十分な水田期間を確保した輪換畑における大豆育種研究室による生産力検定試験の田作大豆（「豆育田作」）について、本試験に対応した品種の収量を示した。

では9年目に当たる1990年以降を図示している。長期畑輪換による大豆の収量は、20年近い連作でも著しい減収には至らなかったが、隣接ほ場で実施された十分な水田期間を確保した生産力検定試験の田作大豆^{*}と比べると1993年以降は10～20%の減収であった。また、稲わら堆肥2トン/10aの連年施用により一定の収量性の改善効果が認められた。18年間の長期畑輪換のあと3年間の水田への復元を経て再畑転換した場合（2003年、スズカリ）、この大豆の収量は、生産力検定試験の田作大豆に比べて劣り、長期畑輪換の期間（1993年から1999年、スズカリ）とほぼ同等な関係にとどまった。すなわち、いわゆる田畑輪換効果とされる増収とはならなかった。

2) 田畑輪換体系における大豆・水稻の生産力の経年変化

試験Aにおける田畑輪換の繰り返しに伴う輪換畑大豆や輪換田水稻の生産力の変化を把握する目的で、大豆については生産力検定試験の田作大豆を対照に、水稻については連年水田の水稻を対照にした収量指数で示したのが図3である。この操作は気象

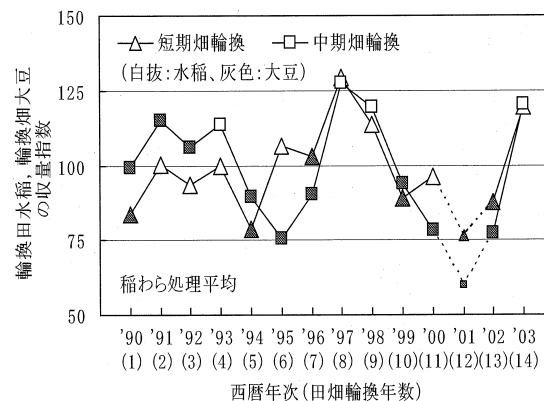


図3 田畑輪換の繰り返しに伴う作物生産力の変化 (試験A)

注. 輪換田水稻、輪換畑大豆の対照は、隣接ほ場の連年水田の水稻及び十分な水田期間を確保した輪換畑における大豆育種研究室による生産力検定試験の田作大豆である。なお、2001年は褐紋病の発生による影響で大豆の収量指数が大きく低下した。

^{*}この生産力検定試験は大豆育種研究室により実施されており、刈和野試験地における畑作大豆に加え、1985年からは大曲キャンパス水田転換畑ほ場における田作大豆についてもデータが蓄積されている。なお、生産力検定試験の比較品種として1992年まではナンブシロメ、1993年以降はスズカリが栽培されている。

変動に伴う作柄の変動を消去しようとするものである。なお、図1でみたように、1994年の稲わら施用に伴う還元障害による減収以外には、稲わら施用の有無による差が小さかったので、ここでは稲わら施用の有無の処理を単純平均して示している。図には示していないが、1994年の稲わら施用に伴う還元障害による減収については、短期畑輪換では収量指数68、中期畑輪換では82となったが、稲わら無施用系列ではそれぞれ90、98で減収の程度は小さかった。また、2001年の輪換畑大豆の収量指数の大きな落ち込みは褐紋病の発生によるものである。

こうした事情を考慮すると、田畑輪換の繰り返しに伴い、輪換畑大豆の収量には減収傾向が読み取れる。一方、輪換田水稻の収量は、田畑輪換を繰り返しても減収することはなく、復元前の数年間の畑期間の多少（長短）が増収の大小に影響し、畑期間が長い輪換体系の水稻が多収傾向にあることが読み取れる。

3) 長期畑転換あとの復元田における水稻の生産力

長期畑転換あとの復元田における水稻の収量を表

3に示した。復元1年目には、稲わら堆肥や窒素肥料の施用の有無によらず、いずれの処理でも連年水田に比べて大きく増加した。復元2年目の2001年は作付け前の春先に晴天が続くという気象条件に恵まれて土壌の乾燥が進み、乾土効果による土壌窒素の発現が多くなり、水稻は旺盛な窒素吸収に支えられて多収年となった。稲わら堆肥や窒素肥料の施用により連年水田でも700kg/10aを超える収量が得られたことから、復元田における増収効果がはっきりと認められたのは稲わら堆肥、窒素肥料ともに除いた区のみであった。しかし、復元3年目においても、1年目には劣るものの50～90kg/10aの増収量となったことから、長期畑転換あとの復元田では、少なくとも3年程度は水稻の増収効果が期待できるといえる。復元田における増収の要因については、作土量の増加（耕起深×仮比重）による単位重量当たり可給態窒素量の減耗の補償、根域の拡大（下層土における根穴が多い）、生育後期までの根の活力の維持（ひこばえ発生量が多い）などが考えられる（住田・加藤2001）。

表3 長期畑転換あとの復元田における水稻収量（試験B） (kg/10a)

肥培管理#	土地利用	2000年 (復元1年目)	2001年* (復元2年目)	2002年 (復元3年目)	3ヶ年平均
－M－N	復元田	448(+44)	590(+96)	468(+31)	502(+57)
	連年水田	404	494	437	445
－M＋N	復元田	696(+124)	770(+11)	762(+83)	743(+73)
	連年水田	572	759	679	670
＋M－N	復元田	677(+126)	680(－35)	671(+94)	676(+62)
	連年水田	551	715	577	614
＋M＋N	復元田	820(+91)	712*(+5)	805(+54)	779(+50)
	連年水田	729	707*	751	729
全平均	復元田	660(+96)	688(+19)	677(+66)	675(+60)
	連年水田	564	669	611	615

注. 復元田の（ ）内の数値は連年水田の同一処理区に対する増収量を示す。

#：肥培管理のMは稲わら堆肥を、Nは窒素施肥を表わし、例えば、－M－Nは無堆肥・無窒素肥料である。

*：2001年は作付け前の春先に晴天が続くという気象条件に恵まれて土壌の乾燥が進み、乾土効果による土壌窒素の発現が多くなり、水稻は旺盛な窒素吸収に支えられて多収年となったが、＋M＋Nの肥培管理では収量過多を招き、登熟不良で収量が伸びなかった。

2 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う土壤肥沃度の変化

1) 田畑輪換体系における土壤の全炭素、全窒素及び可給態窒素の変化

供試ほ場は試験開始時点で全炭素、全窒素に違いがあった（図4）。これは、試験Aのほ場が非アロフェン質の黒色土層が優先で黒くみえるものの、一筆内でもこの黒色土層の混入度合いがやや異なることに由来している（図5）と思われるが、標準的な施肥体系の下では、この黒色土層の混入度合いの違いによる水稻の収量差はほとんどないことが、過去の均一栽培等の結果から確認されている。

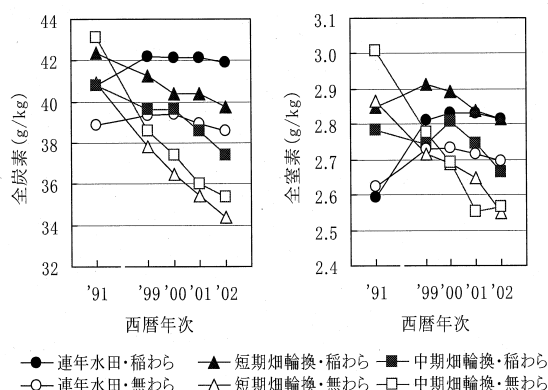


図4 田畑輪換の繰り返しに伴う土壤中の全炭素、全窒素の変化（試験A）

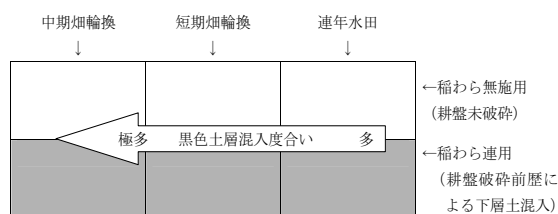


図5 田畑輪換試験ほ場における黒色土層の混入度合いや耕盤処理前歴による土壌むら（試験A）

注. 大曲キャンパスの土壤断面をみると下層に黒色土層が埋没している。試験Aほ場は造成時（1960年代後半）に表層の一部を剥いだため、埋没していた黒色土層が新しい作土に混入したが、その際、一筆内での黒色土層の埋没深の違いが新しい作土への黒色土層の混入度合いの違いとなった。

そこで、試験開始後の変化という視点からみると、連年水田における土壤の全炭素や全窒素は稲わらの補給がなくても維持ないしは増加し、稲わらの施用によってその増加は顕著であった。それに対して、田畑輪換を繰り返すと稲わらの補給がない条件では、全炭素や全窒素は大きく減耗した。年平均の全炭素減耗量は、短期畑輪換で 590mg / kg, 中期畑輪換で 700mg / kg, 全窒素減耗量は、短期畑輪換で 29mg / kg, 中期畑輪換で 40mg / kg となった。一方、稲わらを連用した田畑輪換では、全炭素、全窒素の減耗は軽減された。特に全窒素についてみると、およそ 10 年にわたる田畑輪換を繰り返しても、短期畑輪換であれば、輪換田水稻、輪換畑大豆のいずれの跡地においても、開始時をやや上回るかほぼ同じ水準を維持した。一方、中期畑輪換の場合には、輪換田水稻を 2 年作付けした跡地（図4の'99）の全窒素は開始時をわずかに下回る水準にとどまっていたが、その後再び畑輪換すると低下した。

以上のことから、10 年を超えるような長期にわたる田畑輪換の繰り返しは、10a 当たり 600kg の稲わらを連用しても、全炭素の減少量を補いきれないといえる。他方、全窒素については、輪換畑 1 ～ 2 年の短期畑輪換では稲わらの連用により田畑輪換開始時の水準を維持しうるが、輪換畑期間 3 ～ 4 年の中期畑輪換では稲わらを施用してもその水準の維持は難しいと判断された。

図6は田畑輪換体系における土壤の可給態窒素の変化である。田畑輪換開始時、中期畑輪換の 2 サイクル目あとの輪換田水稻 2 年後、それから 3 サイクル目の輪換畑大豆 4 年後の 3 時期について、各試験区の土壤の可給態窒素量を、連年水田の無わら区を 100 とした指数（以下、可給態窒素指数）で示した。なお、連年水田の無わら区の土壤の可給態窒素は、土壤の調製条件が異なった田畑輪換開始時（微細土でやや高め）を除いて、ほぼ同じであった。また、田畑輪換開始時に稲わら施用系列がやや低めであるのは、図5に示したように、前歴の耕盤処理の影響（窒素肥沃度の低い土壌の混入）であると推察された。

中期畑輪換の稲わら無施用（中期畑・無わら）における可給態窒素指数は、田畑輪換開始時の 106 から 13 年後には 72 に低下し、同じく短期畑・無わらの可給態窒素指数は、101 から 75 に低下した。

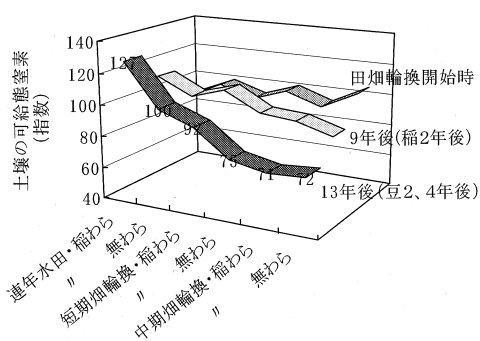


図6 田畑輪換の繰り返しに伴う土壌中の可給態窒素の変化(試験A)

注. 土壌の可給態窒素は連年水田・無わらを100とした指数。

なお、田畑輪換体系は以下のとおり。

短期畑輪換：豆・稲・稲・稲・豆・稲・豆・
稲・稲・豆・稲・豆・豆

中期畑輪換：豆・豆・豆・稲・豆・豆・豆・
稲・稲・豆・豆・豆・豆

これに対して、中期畑輪換の稲わら施用(中期畑・稲わら)における可給態窒素指数は、94から71に低下し、同じく短期畑・稲わらでは、93から92とほぼ横ばいであった。図6では、田畑輪換開始時の可給態窒素指数と13年後の指数との関係からみると、9年後の指数はかなり高い水準にあることがわかる。この9年後というのは前2年が水稻2作であり、13年後というのは前4年が短期畑輪換では大豆・水稻・大豆・大豆、中期畑輪換では大豆4連作である。すなわち、9年後は地力維持・回復型の作型の直後であり、13年後は地力減耗型の作型の直後であることが要因と推察される。特に、転換畑土壌に稲わらを添加して湛水管理する場合には、連年水田土壌に稲わらを添加した場合より生物学的窒素固定による土壌の窒素富化量が多いとされている(安田ら2000)。このことが、地力を減耗する畑期間を1/2未満に抑え、かつ、稲わらを連用する田畑輪換管理において、稲わらを施用しない連年水田並みの窒素肥沃度を維持する一因と推察される。言い換えれば、短期畑輪換でも、大豆作の期間も含めて、稲わらの連用(米の生産に対応する稲わら全量の補給)がないと土壌窒素の減耗は避けられない。なお、連年水田の稲わら施用における可給態窒素指数は、本試験開始時の90から13年後には127に大きく増加した。

2) 長期畑輪換あと復田化による全炭素、全窒素及び可給態窒素の変化

図7には長期畑輪換のあとに復田化した試験Bほ場の土壌の全炭素と全窒素の経年変化を示した。全炭素は畑輪換10年後までに大きく低下し(畑輪換前に比べて13~14%減)、その後ほぼ一定となったのに対して、連年水田では稲わら堆肥の施用の有無にかかわらず18年後まで増加し、その後ほぼ一定となった。一方、全窒素は畑輪換10年後以降も低下し、18年後に稲わら堆肥無施用では畑輪換前に比べて18%減、稲わら堆肥施用では9%減となったのに対して、連年水田では逆に18年後まで増加し、その後ほぼ一定となった。長期畑輪換あとの復田化に伴う全炭素、全窒素の明瞭な変化は読み取れず、ほぼ一定とみなされた。

これに対して、長期畑輪換とその後の復田化に伴う土壌の可給態窒素の変化は明瞭であった。すなわち、図8に示したように、長期畑輪換に伴い可給態窒素は大きく低下したが、その後の復田化により可給態窒素が増加し、地力の回復が示唆される。しかし、稲わら堆肥2トン/10aを連年施用する条件でも、18年の長期にわたる畑輪換を行うと、稲わら堆肥無施用条件の連年水田の可給態窒素を大きく下回り、その後3年間の復田により、ようやくその連年水田の水準近くに回復する程度であった。一般に、稲わらから生産される稲わら堆肥の量的な換算量は約2倍として扱われている。試験Aにおける稲わら施用量600kg/10aは、水稻の収量600kg/10a水準で生産される稲わらの量であり、これを稲わら

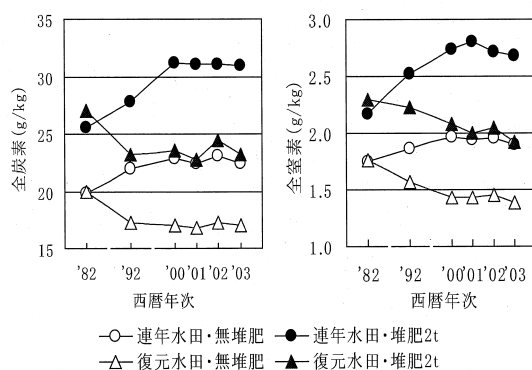


図7 長期畑輪換あと復田化による土壌中の全炭素、全窒素の変化(試験B)

注. 1982年から18年間の畑輪換のあと2000年から3年間復田化した。

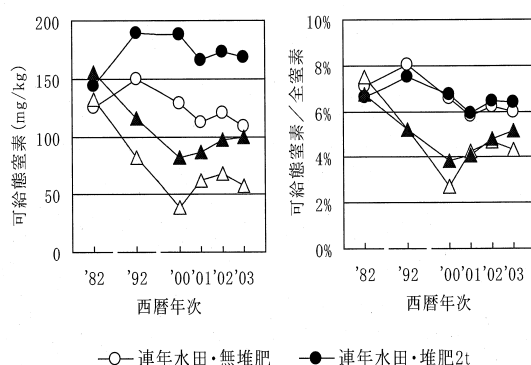


図8 長期畑転換あと復田化による土壤中の可給態窒素の変化（試験B）

注. 1982年から18年間の畑転換のあと2000年から3年間復田化した。

可給態窒素は、風乾土を30℃4週間の湛水培養により無機化した窒素である。

堆肥に換算すれば1.2トン／10aということになる。したがって、試験Bにおける稲わら堆肥2トン／10aというのは決して少ない量ではなく、むしろ多い。それにもかかわらず、稲わら堆肥無施用の連年水田並みの窒素肥沃度さえ維持することができないということになる。

全窒素に対する可給態窒素の比率（可給態画分の比率）をみると、稲わら堆肥の施用の有無による地力窒素水準の違いが消去されるような傾向が伺われる。すなわち、18年にわたる長期畑転換により、稲わら堆肥の施用の有無にかかわらず可給態画分の比率は連年水田の約半分にまで低下したが、3年間の復田により連年水田の7～8割の水準にまで回復した。

3) 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換あと復田化に伴う土壌物理性の変化

表4には田畑輪換の繰り返し13年後の土壌の物理性を示した。短期畑輪換及び中期畑輪換はそれぞれ輪換畑2年目及び4年目の大豆作付け跡地である。作土層（最表層や中位層）の固相率は短期畑輪換より中期畑輪換でやや高かったが、鋤床層では逆に短期畑輪換の方が高かった。稲わらの連用は、短期畑輪換、中期畑輪換のいずれにおいても作土層及び鋤床層の固相率を低くし、気相率を高くした。この気相の大部分を占めるpF1.5の粗孔隙は、最表層では増加したが、中位層では大きな差はなかった。鋤床層におけるpF1.5の粗孔隙は、短期畑輪換より中期畑輪換でやや多く、稲わらの連用により増加した。また、pF1.5からほぼ毛管連絡切断点に相当す

表4 試験Aほ場における田畑輪換繰り返し後の土壌の物理性

試験区	層位	pF1.5の三相分布(%)			孔隙率(%) pF1.5～2.7	仮比重
		固相率	液相率	気相率		
短期畑輪換 稲わら	最表層	25.3	32.5	42.2	5.0	0.69
	中位層	29.5	38.6	31.9	6.3	0.80
	鋤床層	46.3	50.5	3.2	2.3	1.21
短期畑輪換 無わら	最表層	27.4	34.5	38.1	6.7	0.75
	中位層	30.9	37.7	31.4	7.7	0.82
	鋤床層	48.7	48.6	2.7	2.5	1.28
中期畑輪換 稲わら	最表層	26.5	32.4	41.1	5.1	0.73
	中位層	30.5	38.2	31.3	6.4	0.83
	鋤床層	41.3	53.7	5.0	4.1	1.09
中期畑輪換 無わら	最表層	28.6	33.4	38.0	5.1	0.76
	中位層	31.4	37.4	31.2	6.0	0.83
	鋤床層	46.3	50.5	3.2	3.5	1.21
連年水田 稲わら	最表層	32.2	57.5	10.3	8.6	0.85
	中位層	35.2	55.4	9.4	5.5	0.93
	鋤床層	43.2	54.2	2.6	2.6	1.12
連年水田 無わら	最表層	33.9	56.2	9.9	7.6	0.90
	中位層	36.3	54.5	9.2	6.1	0.96
	鋤床層	42.5	55.0	2.5	3.8	1.11

注. 田畑輪換繰り返し13年後の2002年秋に、最表層（0-5cm）、中位層（8-13cm）、鋤床層の各層位について調査。短期畑輪換、中期畑輪換はそれぞれ輪換畑2年、4年後。

る pF2.7 までの水分（一般にはおよそ pF1.8～2.7 を易有効水分としている）を保持する孔隙に対しては、稲わらの施用の効果はなかった。この pF1.5～2.7 の孔隙は、稲わら無施用の条件では、輪換畑期間が短い短期畑輪換でやや多かった。なお、この試験においては、輪換田、輪換畑を問わず同一の作業機（25PS トラクタ）によるロータリー耕起であり、輪換畑における耕盤破碎は実施せず耕盤を維持してきた。

これに対して、長期畑転換試験の土壌の物理性を表5に示した。18年の畑転換のあと復元田3年目の水稲作付け跡地である。長期畑転換の影響は大きく、3年間の復田によっても作土層、鋤床層とも連年水田に比べて固相率、仮比重が大きく、非常にコンパクトな土壌が維持されたままであり、作土層のち密度が大きかった。これは、図7の土壌中の全炭素の減少にみられるように、土壌有機物の減少に起因していると考えられる。また、長期畑転換（復元田）の作土深は連年水田よりやや浅かったものの、10a当たりの作土重量を計算すると、稲わら堆肥無施用で177トン、稲わら堆肥連用で163トンとなり、連年水田（それぞれ161トン、152トン）よりむしろ多かった。長期畑転換の間に、従前の鋤床層の一部が耕うんされたものと推察される。また、すでに述べたようにこの作土量の増加が復元田の増収要因の1つと考えている。

3 減収傾向にある転作大豆に対する肥培管理の効果

田畑輪換を繰り返し、輪換畑の大豆が減収傾向にある2002年（試験Aほ場）と、長期畑転換あと3年間の復田化を経て再畑転換した2003年（試験Bほ場）に実施した窒素施肥法の試験結果を表6に示した。田畑輪換繰り返し試験の2002年は、短期畑輪換では輪換畑2年目、中期畑輪換では輪換畑4年目に当たる。これらいずれの田畑輪換体系においても、LP40の開花期追肥や稲わら施用の肥培管理が大豆に対する収量改善効果ははっきりしなかった。すでに、図4に示したように稲わら施用は土壌の全炭素や全窒素を明らかに改善した。しかし、図1に示したように田畑輪換を繰り返してきたここ数年間（1999年以降）についてみても、短期畑輪換では稲わら施用の有無による大豆の収量差はなく、短期畑輪換より収量水準が低い中期畑輪換でもわずかな増収（平均6%）にとどまった。

長期畑転換試験の2003年は、18年にわたる長期畑転換のあと3年間の水田への復元を経て再び畑転換した1年目に当たる。この場合にもLP70の培土期追肥の効果ははっきりしないが、追肥分をLPS80で基肥として一括施用する全量基肥で、増収効果が認められた。転換畑土壌は、下層になるほど湿潤で嫌気状態にあるため硝酸化成能がより低く、施肥窒素の利用率が高いとされている（高橋ら

表5 試験Bほ場における長期畑転換あと復元田3年後の土壌の物理性

試験区	層位	pF1.5の三相分布(%)			孔隙率(%) pF1.5～2.7	仮比重	山中式 ち密度	作土深 (cm)
		固相率	液相率	気相率				
長期畑転換 稲わら堆肥	最表層	38.4	48.5	13.1	4.2	1.02	16.0	
	中位層	42.0	49.4	8.6	3.2	1.11	18.1	
	鋤床層	47.5	49.0	3.5	2.5	1.25		15.1
長期畑転換 無堆肥	最表層	41.3	47.6	11.1	3.2	1.11	15.8	
	中位層	46.4	47.0	6.6	2.5	1.24	17.1	
	鋤床層	50.4	46.7	2.9	1.9	1.34		14.8
連年水田 稲わら堆肥	最表層	32.9	48.8	18.3	9.5	0.88	10.9	
	中位層	34.2	51.8	14.0	4.6	0.91	13.7	
	鋤床層	43.7	53.8	2.5	3.2	1.16		16.9
連年水田 無堆肥	最表層	35.8	50.7	13.5	5.0	0.95	12.1	
	中位層	38.2	48.6	13.2	3.7	1.01	16.3	
	鋤床層	46.9	50.4	2.7	3.0	1.24		16.2

注. 18年にわたる長期畑転換あと復元田3年後の2002年秋に、最表層（0-5cm）、中位層（8-13cm）、鋤床層の各層位について調査。

表6 減収傾向にある大豆の収量に対する肥培管理の効果 (kg / 10a)

肥培管理	短期畑輪換	中期畑輪換	再畑転換
	'02：畑2年目 (試験A)	'02：畑4年目 (試験A)	'03：畑1年目 (試験B)
標準(基肥のみ)	261	225	277
基肥+追肥	258	230	268
全量基肥	—	—	309
有機質資材・基肥のみ	257	238	267
有機質資材・基肥+追肥	259	226	278
有機質資材・全量基肥	—	—	295

注. 基肥は硫安で N 3kg / 10a, 追肥は 2002 年には開花期に LP40 で, 2003 年は培土期に LP70 で N 7kg / 10a, 全量基肥は硫安 (N 3 kg / 10a) と LPS80 (N 7 kg / 10a) を一括施肥。有機質資材は田畑輪換(短期畑輪換, 中期畑輪換)では稲わらを 600 kg / 10a, 長期畑転換(再畑転換)では稲わら堆肥 2 トン / 10a を連年施用。

1993)。硝酸態窒素は流亡しやすいうえに、開花期以降の大豆はアンモニア態窒素を中心に吸収することから、硝酸化成能の高低は施肥窒素の肥効に大きく影響する。本試験における施肥効果の違いは、試験AのLP40の開花期追肥も含め、施肥位置の違いが一因と推察される。すなわち、開花期追肥は表層に、培土期追肥では培土層に肥料が施用され硝酸化成を受けやすいのに対して、追肥分としてLPS80を一括して基肥施用する場合には作土全層に施用され、相対的に硝酸化成を受けにくいといえる。

なお、図2で示したように、稲わら堆肥の施用には一定の収量性の改善効果(平均10%増収)が認められるが、2003年には稲わら堆肥の増収効果ははっきりしなかった。

4 総合考察

1) 生産現場の田作大豆の収量の趨勢

松村(2004)は田畑輪換の意義として、輪換畑の用水量が減ることによる農業用水の節減(資源的意義)、畑地に比べて総じて地力が高く用水が得やすい水田で栽培することによる畑作物の生産力向上(立地的意義)、湛水状態と畑状態の繰り返しによる土壤の理化学性や生物相の変化を利用した作物生産力の向上(作物生産技術的意義)、作物や作目の多様化による複合経営のメリット(経営的

意義)、に整理している。このうち立地的意義については、農林水産省の作物統計のデータを用いて、田作大豆の畑作大豆に対する収量指数(1980年から1999年の20年間の推移)が概ね100を上回っていることを証拠として挙げている。

寒冷地積雪地帯に位置する東北農業研究センター(大曲キャンパス)において、田畑輪換の繰り返しによる地力の低下に呼応した転作大豆の生産力低下の懸念を示したが、生産現場のマクロな数値がどういう趨勢にあるかは興味がある。1970年代に入ると米の生産調整がはじまり、田作大豆が作付けされるようになったが、本格的にその面積が拡大していったのは1970年代後半からである。そこで、松村(2004)が用いた期間の作物統計データに最近のデータと、1980年以前のデータを追加して作図したのが図9である。この図から次のようなことが読み取れる。1点目は、都府県全体でみると、生産現場で水田へ大豆の作付けが始まって間もない頃には、畑作大豆とほぼ同等の収量水準に過ぎないが、1981年以降は田作大豆の有利性が認められる。これは、水田への作付けが浸透して技術水準が向上した現れであり、好適な栽培技術の開発と普及の証拠といえる。

2点目は、水田で繰り返し大豆(あるいはそのほかの転作作物)を生産してきたことに伴い^{*}、田作

※ここでいう繰り返しは田作大豆(あるいは転作作物)の連作に限ったものでない。ブロックローテーションや田畑輪換等による繰り返しも含んでいる。作物統計からだけでは、米の生産調整を始めてから田作大豆(あるいは転作作物)が何回作付けられた結果のデータであるかは把握できない。しかし、米の生産調整はすでに四半世紀をゆうに超え、現在では水田の40%に達していることから、経年的にみれば、年々、田作大豆(あるいは転作作物)の作付履歴が増えていく条件でのデータと想定される。

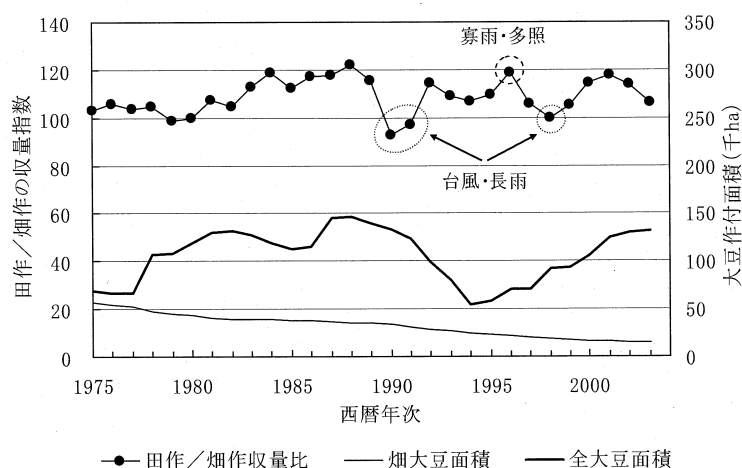


図9 都府県の田作大豆の畑作大豆に対する収量指数の推移

大豆の有利性が小さくなってきているのではないかという懸念である。田作大豆が畑作大豆に比べて相対的に不利であった1990年、1991年、1998年（台風や長雨で水田が冠水や滞水）や有利であった1996年（寡雨・多照で畑が過乾）など異常気象の影響を除くと、1990年代に入ると田作大豆の有利性が以前よりやや低い傾向にある。田作大豆といえども、連作による病害・線虫害や雑草害による減収は避けられないので、低下傾向の一因は連作障害にあるかもしれない。しかし、こうした理由による減収は外観的に容易に把握できるため、田作大豆の連作は一般的には回避されるであろう。畑状態では水田状態に比べて有機物の減耗が激しいことに加え、大豆は難溶性の土壤窒素を分解・消費すると指摘されている（有原 2000）ことから、図9から読み取れる田作大豆の有利性の低下は、地力窒素の低下による可能性が高い。田作大豆の有利性は2000年前後にやや回復傾向がみられる。これは、1993年の冷害後に生産調整が大幅に緩和されて各地でブロックローテーションが崩れ、結果的に水田期間が十分に確保されることになって地力の回復が図られ、再び生産調整の強化により作付けられた田作大豆には、田畑輪換による増収効果が認められた結果と考えることができる。

2) 土壤窒素の減耗を補う肥培管理

大豆は、根粒による固定窒素を利用すること、窒素肥料に対する施肥反応が小さいことなどから、大豆の生産においては積極的な肥培管理が実施されに

くい。一般的に水田は畑に比べ地力が高いことから、その転換畑における大豆の生産においては、適切な排水対策を講ずれば畑作大豆に比べて一層多収傾向が強くなる。

大豆の単収が300kg/10aの場合、子実中にはおよそ16kg（ $300\text{kg} \times 85\% \text{（乾物率）} \times 6.4\% \text{（蛋白質含有率40\%）}$ ）の窒素が含有され、落葉や茎、莢殻の窒素も合わせると、大豆の窒素吸収量は20kg前後にもなる（表7）。水稻の単収が600kg/10aの場合、水稻の窒素吸収量は10kg程度であることから、大豆は水稻のおよそ2倍ということになる。この多量の窒素吸収を支えているのが根粒による固定窒素ではあるが、その寄与率は土壌や気象といった環境条件によって異なり、我が国の平均的な値は5割程度とされている（Yoneyama et al. 1986）。大豆の吸収窒素の大部分が子実として持ち出されることから、たとえすべての収穫残さを還元し、慣行的な窒素施肥（基肥3kg/10a程度）をしても、大豆生産の窒素収支はマイナスになり、土壌窒素の減耗が進むことになる。転換畑や輪換畑における大豆が畑作大豆に比べて多収となることが多いが、窒素についてみれば、それは土壌窒素の減耗の上に成立しているものであり、持続的生産のためには、土壌窒素の減耗を補うような肥培管理に目を向ける必要がある。

基肥窒素の多施用は根粒の着生や窒素固定を阻害することや、大豆は開花期以降の生育後期に多くの窒素を吸収することなどから、根粒の窒素固定能を

表7 大豆及び水稲生産における窒素収支 (N kg / 10a)

	窒素吸収量			生物学的 窒素固定	窒素施肥	過不足	
	全 体	子実／籾	収穫残さ			残さ還元	残さ搬出
大豆	20	16	茎殻：1.2 落葉：2.8	10	3	-3	-4.2
水稲	10	7	3	2	8	+3	±0

注. 試験 A の収量レベル，施肥レベルを想定した窒素収支。大豆の収穫残さのうち落葉分は，最大繁茂期と成熟期の窒素吸収量の差とした。大豆生産における生物学的窒素固定は大豆の窒素吸収量の 5 割（Yoneyama et al. 1986），水稲生産では大曲キャンパスでの実測値（安田ら 2000）を採用した。大豆の残さ搬出は茎殻のみをカウントした。

損なうことなく生育期間を通じて持続的な窒素供給が期待できる肥培管理が肝要であり，有機質資材による土づくりに期待が向けられる。

これまでの議論から，大豆の本作化を目指し，大豆を基幹とした田畑輪換で大豆の多収を追求することが土壤の窒素肥沃度を大きく減耗させることは，容易に類推できる。また，田畑輪換における生産の持続性を支える土壤の窒素肥沃度の維持のためには，単に作物残さの還元や有機質資材の施用を実施すればよいというものでないことも，ここで取り上げた試験結果から明らかである。また，ここでは議論していないが，現在，大豆 300A プロジェクト（2002 年 6 月に農業・生物系特定産業技術研究機構に大豆 300 A 研究センターが設置され，大豆の収量 300kg / 10a，A クラス品質の生産を実現する大豆新栽培システムの開発を目指した研究を推進）において，輪換畑での大豆の苗立ち安定の観点から土壤タイプとティレッジ方式との関係が検討されている。一般に，不かく乱土壤を培養した場合の土壤窒素無機化量はかく乱土壤より少なく，耕起栽培に対して不耕起栽培における地力窒素の発現は少ないことから，不耕起栽培では窒素肥沃度は温存されるのではないかと考えられている（長野間 1998）。したがって，大豆の苗立ち安定の観点から採用されるティレッジ方式は土壤窒素の減耗あるいは温存とも大きくかかわってくる。長期的な視点からみた田畑輪換での大豆や水稲の安定生産を支える地力維持の方策については，田畑輪換サイクル（適切な畑期間と水田期間の組み合わせ），有機質資材投入管理，ティレッジ方式を総合的に検討する必要がある。

引用文献

- 1) 有原丈二. 2000. ダイズ安定多収の革新技術. 農文協. p.135-140.
- 2) 花井雄次. 1987. 汎用水田における作付け体系. 研究ジャーナル 10(9): 28-32.
- 3) 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壤養分動態と最適な水田・畑期間. 土肥誌 64: 154-160.
- 4) 松村修. 1992. 水田作付体系における地力維持対策. 農業技術 47: 488-492.
- 5) 松村修. 2004. 田畑輪換. 新編農学大事典. 養賢堂. p.1014-1020.
- 6) 長野間宏. 1998. 土壤不耕起管理の意義. 農及園 73: 171-176.
- 7) 農林水産省編. 1987. 水田農業確立のための技術指針. 全国農業改良普及協会.
- 8) 住田弘一, 加藤直人. 2001. 長期畑転換あとの復元水田における水稲生産力. 東北農研 54: 59-60.
- 9) 住田弘一, 加藤直人, 西田瑞彦. 2002. 寒冷地灰色低地土水田における堆肥長期連用試験からみた化成肥料及び堆肥中の窒素の行方. 東北農研研報 100: 49-59.
- 10) 住田弘一, 加藤直人, 西田瑞彦. 2003. 平成 14 年の長雨日照不足が水稲及び大豆の生育・収量に与えた影響. 東北農研 56: 65-66.
- 11) 高橋均. 1983. 田畑輪換と集団的土地利用一技術研究サイドから一. 農業経営研究 42: 14-22.
- 12) 高橋能彦, 池主俊昭, 中野富夫, 大山卓爾. 1993. ダイズ栽培圃場において追肥または深層施肥した被覆尿素の土壤中における動態. 土肥誌 64: 338-340.

- 13) 佃和民. 1989. 田畑輪換における輪換年数の設定—関東東海地域における試験成績の紹介—. 農及園 65 : 385-388.
- 14) 安田道夫, 岡田泰明, 野副卓人. 2000. 東北地域における汎用水田の窒素富化機能の特徴. 土肥誌 71 : 849-856.
- 15) Yoneyama, T. ; Nakano, H. ; Kuwahara, M. ; Takahashi, T. ; Kambayashi, I. ; Ishizuka, J. 1986. Natural ^{15}N abundance of field grown soybean grains harvested in various locations in Japan and estimate of the fractional contribution of nitrogen fixation. Soil Sci. Plant Nutr. 32 : 443-449.