

持続性を目指した畑作物－雑草共生系に関する基礎的研究

原 涼子・坂井直樹*

筑波大学大学院生命環境科学研究科生物圏資源科学専攻,
305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

要 旨

環境負荷の低減を目指す生産システムを構築するための一方法として、雑草を完全に排斥するのではなく、作物と雑草を共生させる生産システムを提案するため、耕地に作物－作物、作物－雑草を共生させた系を構築し、窒素利用効率や炭素固定量、および土壌環境に対する応答をみた。2002年からの2年3作において、耕うん方式、作付様式、および雑草処理を要因とした畑作圃場実験を実施した。雑草と作物の共生により作物の収量は減少したが、地上部全体の乾物生産量や炭素および窒素固定量が増加した。不耕起区での作物収量が耕起区に比べて低下した。中型土壌動物については、不耕起と雑草共生によりその個体数が増加した。以上の結果より、雑草を共生させることによって複数の利点が得られる可能性が示されたが、生産方式として確立するためには、さらに作物生産量と雑草生産量の制御方法などを検討していく必要がある。

キーワード：作物－雑草共生系、持続的農業、生物多様性、炭素固定量、土壌動物

緒 言

「農業は雑草との戦いである」という言葉があるように、雑草管理は農業上の重要な作業であり続けている。従来、雑草は常に耕地から排除すべき対象とされ、そのために多くの労力や資材が投入されてきた。しかし現在では、農業者の高齢化の進行や労働力の減少などによって除草にかかる相対的負担が増大するとともに、除草剤施用の機会が増えることにより、化学農薬による事故や安全性への懸念などさまざまな問題が生じている。近年関心の高まっている周辺環境への負荷としても、農薬の系外への流亡による水質汚染や、周辺に生息する生物への影響（西尾 2005）などが指摘されている。また、除草剤耐性をもつ雑草種が出現し、その繁茂が問題化する一方、生息数を激減させている雑草種も増加していることが明らかになってきている（Marshall 2003）。耕地雑草とよばれる植物の多くは、耕地に適応した特性をもつように急速に進化してきたため、他の生態系では生存が難しいとされる種が多く存在する。集約的な除草方法が普及していく中、日本でも絶滅危惧種として記載（環境省 2000）されるほどその数を減少させた種も少なくない。

* Corresponding Author: nsakai@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

近年、農業がもつ環境負荷が、最終的に排出元である農業生態系に還元される仕組みが明らかになりつつある。そのため、作物の効率的生産だけでなく、持続的生産システムの構築と生物多様性保全の観点からも雑草防除を考慮する必要性が提唱されはじめている (Marshall 2003)。従来、作物の効率的生産を達成するために、作物の生育期間中は雑草の発生を許さない管理が進められていた (佐合 1999) が、上述のような環境負荷の存在が明らかになるに従い、その問題点に注目が集まっている。一方で、人間が土地を耕し、作物を栽培している限りいくら除草しても耕地から雑草がなくなることはない (冨永 2005) といわれる。そのため本研究では、雑草が必ず生息してしまうのであれば、それを完全に排斥しようとするのではなく、作物と共生させることによって環境負荷の低減を目指す生産システムを構築することは可能かということに着目した。

雑草の導入がもたらすメリットとして、対象作物の収量減やシステムの複雑化などが想定される。しかしその一方で期待されるメリットとして、①圃場に複数種の植物を生育させた場合、それら個々の養分吸収能や生育期間、形態の違いによって、モノカルチャーのように単一種を生育させた場合と比較して、群落の生産量が高くなる場合があることが広く知られているため、単作に比べて、複数の作物あるいは雑草を含めた系では、合計の乾物生産量が增大するのではないかと、②構成する植物種の増加によって、系内の生物種や数が増加し天敵関係が複雑化し、システムとして安定化するのではないかと、が想定される。①に関しては、複数種の植物による養分吸収の効率化 (Joliffe and Wanjanu 1999) と、土壤に還元可能な有機物の確保 (小松崎 1999)、人間によって持ち出されない炭素源確保 (Carbon sequestration) として温室効果ガス発生量の削減への寄与が期待され、②については、生物種やその数の増加によって、系における物質循環が促進される可能性が考えられる。また一方で、耕うんなどの管理技術がこれらの生物の個体数や種組成に影響を与えることも考えられる。

そのため本実験では、耕地に作物-作物、作物-雑草を共生させた系を構築し、作物および雑草による乾物生産量や周辺環境に対する応答、また管理技術の中から、土壤環境を大きく変化させることが知られている耕うん (宮崎 1998) が、植生や土壤環境に及ぼす影響を調べることを目的とした。

材料および方法

1. 実験要因と栽培管理

実験は2002年5月に筑波大学農林技術センター内の畑作圃場で開始し、2003年10月まで、夏作 (1作目: 2002年5月播種, 同年9月収穫)、冬作 (2作目: 2002年10月播種, 2003年6月収穫)、夏作 (3作目: 2003年6月播種, 同年10月収穫) と、2年3作の輪作を行った (表1)。

要因として、①耕うん方式、②作付様式、③雑草処理を取り上げた (表2)。①耕うん方式として、播種前にロータリで耕起を行う耕起区と、耕うんを省略した不耕起区の2水準を設定した。なお、実験開始前に圃場全体を均一に耕うんしたため1作目には耕うん方式の要因は含まれない。②作付様式の要因として、各作付につき2種類の作物を供試し、その作物それぞれの単作、その2種類の混作という3水準を設定した。混作では、2種類の作物を1畦ごとに交互に播種した。③雑草処理の要因として、雑草を放任し除草を行わない雑草区と、適宜手取り除草を行って無雑草状態を維持する除草区の2水準を設定した。

表1 作業および調査暦.

作付および供試作物	日付	作業	調査	
1作目 (夏作) トウモロコシ (M) ソルガム (S)	2002/5/29	施肥 (6kgN/10a) 耕うん	採土, 土壤貫入抵抗① 土壤動物個体数 以後2週間ごとに生育・土壤動物を調査	
	30	播種		
	31	防鳥網設置		
	6/14	間引き 防鳥網撤去		
	8/1	追肥 (4kgN/10a)		
	15	防鳥網設置		
	9/5	作物収穫		
	9	雑草収穫	雑草優占種	
	10/2		採土, 土壤貫入抵抗② 土壤水分体積比① 土壤動物個体数 以後1ヶ月ごとに生育・土壤動物数を調査	
	2作目 (冬作) コムギ (W) オオムギ (B)	29	施肥 (10kgN/10a) 耕うん (耕起区のみ)	
		30	播種	
		12/20	踏圧	
		2003/5/10	防鳥網設置	
6/6		作物収穫		
7		雑草収穫 防鳥網撤去	雑草優占種 採土, 土壤貫入抵抗③	
24				
3作目 (夏作) トウモロコシ (M) ソルガム (S)	6/27	耕うん (耕起区のみ) 施肥 (12kgN/10a)	土壤動物個体数 以後2週間ごとに生育・土壤動物を調査	
	28	播種		
	29	防鳥網設置		
	7/8	間引き		
	9	防鳥網撤去		
	8/1	追肥 (6kgN/10a) 防鳥網設置	土壤水分体積比②	
	10/4	作物収穫		
	6	雑草収穫 防鳥網撤去	雑草優占種	
	8		採土, 土壤貫入抵抗④	

夏作の作物には飼料用トウモロコシ (*Zea mays* L., cv. スノーデント125, 以下略号 M) とソルガム (*Sorghum bicolor* L. Moench, cv. 高糖分ソルゴー, 以下略号 S) を, 冬作の作物にはコムギ (*Triticum aestivum* L., cv. 農林61号, 以下略号 W) とオオムギ (*Hordeum vulgare* L. cv. カシマムギ, 以下略号 B) を用い, 合計12処理区を3反復の乱塊法で配置した。複数種の植物が存在する混合群落における競合を決定付ける要因には, 葉や根の形態, 養分吸収能などさまざまなものが挙げられる (Loomis and Conner 1999) が, 本実験においては, 解釈を簡便に

表2 処理区の設定.

耕うん	作付様式*			雑草処理	処理区の名称
	1作目 (夏作)	2作目 (冬作)	3作目 (夏作)		
耕起	M	W	M	雑草	耕起 M-W-M 雑草区
	M	W	M	除草	耕起 M-W-M 除草区
	S	B	S	雑草	耕起 S-B-S 雑草区
	S	B	S	除草	耕起 S-B-S 除草区
	MS	WB	MS	雑草	耕起 MS-WB-MS 雑草区
	MS	WB	MS	除草	耕起 MS-WB-MS 除草区
不耕起	M	W	M	雑草	不耕起 M-W-M 雑草区
	M	W	M	除草	不耕起 M-W-M 除草区
	S	B	S	雑草	不耕起 S-B-S 雑草区
	S	B	S	除草	不耕起 S-B-S 除草区
	MS	WB	MS	雑草	不耕起 MS-WB-MS 雑草区
	MS	WB	MS	除草	不耕起 MS-WB-MS 除草区

注1) 不耕起は2002年冬作からとした。

注2) 混作として各作物を1畦ごとに播種した。

注3) 雑草区では雑草を放任し、作物の生育期間中まったく除草を行わなかった。

また、除草区では無雑草状態を維持するよう適宜手取り除草を行った。

W: コムギ単作, B: オオムギ単作

MS: トウモロコシ・オオムギ混作, WB: コムギ・オオムギ混作をそれぞれ示す。

するため、草丈に差があるがその他の形態や性質が類似している作物の組み合わせとした。また、混作(間作)の多くには窒素源としてマメ科作物が取り入れられる(小松崎 2000)が、まず収奪による物質の流れを把握するため全てイネ科作物とし、植物残渣はすべて圃場外に搬出した。1処理区は2.8m×3.2mとし、各区に夏作は畦間70cm×株間20cmで点播し、冬作は畦間35cmで条播した。

作業および調査暦を表1に示す。1作目は2002年5月29日に高度化成肥料(N, P₂O₅, K₂O各14%含有)を用い、6kgN/10aの割合で施肥をした後、ロータリ(耕深約30cm)で圃場全体を均一に耕うんし、その翌日播種を行った。8月1日に同肥料を用い、4kgN/10aで各個体の株元に追肥を行った。9月5日(播種後14週目)に作物地上部を収穫した。9月9日に雑草の収穫を行い、調査対象外の作物と雑草の残留物すべてを圃場外に搬出した。2作目は2002年10月29日に同肥料を用い、10kgN/10aで施肥をした後、耕起区にのみ耕うんを行い、その翌日播種量8kg/10aで播種を行った。2003年6月6日(播種後31週目)日に作物の収穫、その翌日に雑草の収穫を行い、残留物を搬出した。3作目は2003年6月27日に高度化成肥料(N=10%, P₂O₅=20%, K₂O=10%)を用いて12kgN/10aの割合で施肥をした後、耕起区の耕うんを行い、その翌日播種を行った。8月1日に高度化成肥料(N, K₂O各16%含有)を6kg/10aの割合で各個体の株元に追肥した。10月4日(播種後14週目)に作物地上部の収穫を行い、10月6日に雑草の収穫を行った。

2. 調査項目

1) 植物乾物生産量および雑草種

各要因が作物と雑草の乾物生産量およびそれらを合計した全体の乾物生産量に及ぼす影響を検討するため、各処理区における作物乾物生産量と雑草乾物生産量および雑草の種ごとの個体

数を調査した。

①作物乾物生産量：1作目、3作目は、各処理区から中央の20個体について作物地上部を収穫し、そのうちの3個体を無作為に選び乾燥した後、乾物重を測定した。この値を乾物率の代表値とし、生体重に乗じて処理区ごとの乾物生産量を求めた。2作目は、各処理区中央4畦から各1m作物地上部を刈り取り乾燥した後、乾物重を測定した。乾燥はすべて通風乾燥機を用い、48時間×80℃で行った。

②雑草乾物生産量および種ごとの個体数：各作付の作物収穫後に、1辺70cm (0.49m²)の方形枠を用いて、1作目では各処理区3か所、2作目、3作目では各処理区2か所の雑草地上部を刈り取り乾燥した後、それらの乾物重を測定した。乾燥条件は作物乾物生産量の調査に準じた。また、乾物生産量を測定するための雑草収穫後から1週間以内に、同じ方形枠を用いて枠内の雑草を根ごと引き抜き、種ごとの個体数を調査した。

2) 窒素利用効率

窒素利用効率とは、無機態窒素供給量または化学肥料相当リン酸やカリ施用量に対する植物地上部の吸収した養分量の割合を指す(西尾 2005)。この値を用いて各要因が窒素吸収に及ぼす影響を検討した。本研究では施肥窒素量に対する植物地上部窒素固定量の割合として窒素利用効率を算出した。

単位面積当たりの植物地上部窒素固定量は、作物および雑草地上部の乾物重を測定終了後、遠心粉碎機(日本精機製作所, ZM-100)に孔径0.25mmのフィルターを装着し、乾物サンプルを粉碎・篩分した後、N, C-Analyzer(住化分析センター, Sumigraph NC-800)を用いて乾物サンプルの窒素含有率を求め、乾物重に乗じて算出した。この植物窒素固定量を投入された窒素肥料量で除して窒素利用効率を求めた。

3) 植物炭素固定量

従来は、耕地で生産される作物に対して、多くの場合利用可能な部位のみに合目的な価値が見出されてきた。しかし、例えば地球温暖化防止の観点からは、森林に存在する植物の場合と同様、圃場に生育する植物を、耕地で大気中の二酸化炭素を固定する間接的な資源として捉えることができる。また、地力維持のため、土壤に還元可能な有機物を確保(小松崎 1999)するという利用法も考えられる。そのため1m²あたりに存在した植物の炭素含有量の合計値を、単位面積当たり植物炭素固定量とし算出した。単位面積当たり植物炭素固定量を算出するため、既述のN, C-Analyzerを用いて作物および雑草の炭素含有率を求めた。測定方法は窒素含有率に準じた。この炭素含有率を乾物重に乗じて植物地上部炭素含有量を求め、単位面積当たり植物炭素固定量とした。

4) 土壌特性

各要因が土壌特性に及ぼす影響を検討するため、土壌窒素および炭素含有率、土壌貫入抵抗および土壌体積水分比、中型土壌動物個体群密度を調査した(表2)。

①土壌窒素および炭素含有率

土壌窒素および炭素含有率を計測するため、均一耕うん後の実験開始前、各作付け収穫後の計4回、耕うん後施肥前に、各試験区5地点、深さ10~15cmの部分から採土した。この5地点から採取された土壌を混合したものを各処理区の土壌サンプルとした。これらの土壌サンプルは風乾後2mm径のふるいで篩分し、さらに乳鉢で微粉碎した後、既述のN, C-Analyzerを用いて炭素と窒素の各含有率を求めた。なお、肉眼で確認できた植物遺体はその都度土壌サン

プルから取り除いた。

②土壌貫入抵抗および土壌体積水分比

土壌貫入抵抗については、各処理区中央の畦間3地点で貫入式土壌硬度計（大起理化工業DIK-5520）を用いて、耕うん後実験開始前（2002年5月28日）、1作目の収穫後（2002年9月8日）、2作目の収穫後（2003年6月24日）、3作目の収穫後（2003年10月8日）の計4回測定した。土壌水分含有率（体積水分率（%））については、各処理区中央の畦間3地点で、土壌水分測定装置（Cambell Scientific, Inc.）を用いて、1作目の収穫前（2002年9月8日）、3作目の収穫前（2003年10月1日）の計2回測定した。

③中型土壌動物個体群密度

土壌動物の種類や個体数は、生息の場である土壌の種類や管理方法の影響を受け（Nakamoto 2006）、土壌環境との密接な関係が予測されることから、これら土壌動物相を圃場の土壌環境指標として利用する研究が行われている。本実験では、土壌環境指標として利用されることの多い中型土壌動物相（Doran 2000, Noti 1996 Alvarez 2001, Gormsen 2006など）を、土壌の生物性を表す指標として採用し、その個体数を計測した。中型土壌動物とは一般に体長0.2mm以上2mm未満の土壌動物を指すが、本実験においては、ツルグレン装置を用いて採集することができる動物群を指すこととした（原田 1995）。土壌動物の採取は、作付前、収穫後、および1, 3作目は播種から2週間ごと、2作目は1ヶ月ごとに7回行った。土壌動物の抽出は、各処理区の畦間から採土缶（渡辺, 1979）を用いて、100cm³の土壌サンプルを採取し、これらの土壌サンプルをツルグレン装置で24時間処理して行った。土壌の採取は、降雨のあった当日およびその翌日には行わなかった。抽出された土壌動物は、95%濃度のエタノールを入れたビーカーで受け、すぐに実顕顕微鏡下で青木（1999）の方法に従って目ごとに分類し、各個体数を求めた。

結果および考察

1. 植物乾物生産量

1) 1作目（夏作）

1作目の単位面積当たり乾物生産量に、作付様式および雑草の有無が及ぼす影響を表3に示す。

作付様式による差は、作物乾物生産量にはみられなかったが、雑草乾物生産量には差がみられ、S単作区 \geq MS混作区 \geq M単作区となった。M単作区において雑草乾物生産量が低い値を示したのは、ソルガムと比較してトウモロコシの草丈が高く、より雑草を抑制したためと推察される。

雑草処理による差は作物乾物生産量と、全体（作物+雑草）の乾物生産量にみられた。作物乾物生産量は除草区 $>$ 雑草区となったが、両区の作物乾物生産量の差よりも、雑草区の雑草乾物生産量が大きかったために、全体の乾物生産量は、雑草区 $>$ 除草区となった。

雑草優占種に要因による差はみられず、全ての処理区にメヒシバ、メマツヨイグサ、セイタカアワダチソウの発生がみられた。

2) 2作目（冬作）

2作目の単位面積当たり乾物生産量に、耕うん方式、作付様式および雑草の有無が及ぼす影響を表4に示す。

表3 作付様式および雑草処理が1作目の乾物生産量に及ぼす影響。

要因		乾物生産量 (g/m ²)		
作付様式 (C)	雑草処理 (W)	作物	雑草	全体
M	雑草	846 ab	662 b	1508 ab
	除草	1215 a	-	1215 abc
S	雑草	701 b	796 a	1497 ab
	除草	992 ab	-	992 c
MS	雑草	939 ab	747 ab	1686 a
	除草	1137 ab	-	1137 bc
作付様式 (C)	M	1031	331 b	1362
	S	846	398 a	1245
	MS	1038	373 ab	1412
雑草処理 (W)	雑草	829 b	735	1564 a
	除草	1115 a	-	1115 b
C×W		NS	-	NS

注1) 同一英文字を付した平均値間には Tukey-Kramer の HSD 検定において 5%水準で有意差がないことを示す。

注2) NS は分散分析の結果有意差がないことを示す。

注3) M はトウモロコシ単作, S はソルガム単作, MS はトウモロコシ・ソルガム混作をそれぞれ示す。

耕うん方式による差が、作物乾物生産量、雑草乾物生産量にみられた。作物乾物生産量は、耕起区>不耕起区となった。耕起区の雑草乾物生産量は、平均値で不耕起区の約12%と低い値を示した。このことから、耕起により雑草の生育が抑制されたと考えられる。これは、作付期間中に存在する雑草に越年生植物が多く、耕うんの際損傷を受け、生育が大きく阻害されたために起こり、また、雑草の生育が抑制されたために、作物乾物生産量が耕起区で増加したと推察される。全体の乾物生産量は、不耕起区で雑草乾物生産量が大きかったために不耕起区=耕起区となった。

作付様式による差は作物乾物生産量でみられ、W単作区≧WB混作区≧B単作区の順に高い値を示した。

雑草処理による差は作物乾物生産量および全体の乾物生産量でみられた。作物乾物生産量は除草区>雑草区となったが、1作目と同様、両区における作物乾物生産量の差が平均で59gDW/m²だったのに対し、雑草区における雑草乾物生産量が175.8gDW/m²だったために、全体の乾物生産量は雑草区>除草区となった。

また、全体の乾物生産量には、耕うん方式と雑草処理の2要因間に交互作用がみられ、耕起×雑草区と耕起×除草区、および不耕起×除草区の間には全体の乾物生産量に差がみられなかったのに対し、不耕起×雑草区の乾物生産量が他の3処理区より高い値を示した。これは、耕起×雑草区の雑草乾物生産量がわずかであり、全体の乾物重に耕起×除草区との差がなかったこと、また、不耕起×除草区の作物乾物生産量が耕起×除草区と差がみられなかったことに起因した。

供試圃場全体では19種類の雑草種が存在していた(不明分を含めず)。しかし、すべての処理区で優占種となったのはメマツヨイグサ、ヨモギ、ノビル、オオアワダチソウ、サナエタデのいずれかであった。処理間に有意差がみられたメマツヨイグサとサナエタデの個体数について

表4 耕うん方式、作付様式および雑草処理が2作目の乾物生産量に及ぼす影響、

要因			乾物生産量 (g/m ²)			
耕うん (T)	作付様式 (C)	雑草処理 (W)	作物	雑草	全体	
耕起	W	雑草	298 abc	9 b	306 bc	
		除草	385 a	—	385 abc	
	B	雑草	263 abc	46 b	310 bc	
		除草	313 abc	0	313 bc	
	WB	雑草	307 abc	57 b	364 abc	
		除草	348 ab	—	348 abc	
不耕起	W	雑草	217 bc	252 a	469 ab	
		除草	321 ab	—	321 bc	
	B	雑草	154 c	348 a	501 ab	
		除草	198 bc	—	198 c	
	WB	雑草	203 bc	343 a	547 a	
		除草	228 abc	—	228 c	
	耕うん方式 (T)		耕起	319 a	19 b	338 b
			不耕起	220 b	157 a	377 a
作付様式 (C)		W	305 a	65	370	
		B	232 b	98	330	
		WB	272 ab	100	372	
雑草処理 (W)		雑草	299 a	—	299 b	
		除草	240 b	176	416 a	
T×C			NS	NS	NS	
T×W			NS	—	***	
C×W			NS	—	NS	
T×C×W			NS	—	NS	

注1) 同一英文字を付した平均値間には Tukey-Kramer の HSD 検定において 5%水準で有意差がないことを示す。

注2) ***は分散分析の結果0.1%水準で有意差があることを示し、NSは有意差がないことを示す。

注3) Wはコムギ単作、Bはオオムギ単作、WBはコムギ・オオムギ混作をそれぞれ示す。

て表5に示す。各処理区における種ごとの個体数を比べると、越年草であるメマツヨイグサの個体数は不耕起区>耕起区となった。このことは、不耕起区においては根茎の損傷が少なく、11月～3月の間にロゼット状態で越冬することができ、4月以降の生育期に有利に作用したためと推察される。また、一年草のサナエタデの個体数は耕起区>不耕起区となった。このことは、不耕起区では前年からの植物体が損傷少なく残っていたのに対して、耕起区では冬季にはほとんど雑草の発生がみられず、3月中旬ごろから発生したものが多く、初期成育の旺盛な1年草のサナエタデが多く存在できたことによると推察される。

3) 3作目 (夏作)

3作目の単位面積当たり乾物生産量に、耕うん方式、作付様式および雑草の有無が及ぼす影響を表6に示す。

耕うん方式による差は作物乾物生産量にみられ、耕起区>不耕起区となった。雑草乾物生産量には差がみられなかったため、全体の乾物生産量も耕起区>不耕起区となった。3作目で

表5 耕うん方式, 作付様式が2作目の雑草個体数に及ぼす影響.

要因		個体数 (No./m ²)	
耕うん (T)	作付様式 (C)	メマツヨイグサ	サナエタデ
耕起	W	1 b	24 b
	B	1 b	93 a
	WB	1 b	43 ab
不耕起	W	35 a	2 b
	B	27 ab	16 b
	WB	27 ab	26 b
耕うん方式 (T)	耕起	1 b	53 a
	不耕起	30 a	15 b
作付様式 (C)	W	18	13 b
	B	14	55 a
	WB	14	34 ab
T×C		NS	NS

注1) 同一英文字を付した平均値間には Tukey-Kramer の HSD 検定において 5%水準で有意差がないことを示す。

注2) NS は分散分析の結果有意差がないことを示す。

注3) W はコムギ単作, B はオオムギ単作, WB はコムギ・オオムギ混作をそれぞれ示す。

は, 雑草乾物生産量に耕うん方式による差がみられなかったが, 発生した雑草種には違いがみられ, 不耕起区で多年生の雑草が広く観察された。耕うん処理の継続にともない, 雑草種が変化することについては多くの報告がある (Gill and Arshad 1995, Skordaら1997, Fenteら1999)。Bilalis ら (2001) の実験でも, 不耕起方式を3年間継続した場合, 多年生雑草が多く発生したことが報告されている。

作付様式による差は作物, 雑草, および全体の乾物生産量においてみられた。作物乾物生産量は, M単作>MS混作>S単作となり, 雑草乾物生産量は作物乾物生産量とは逆にS単作≥MS混作≥M単作となった。作付様式については, 1作目と同様にS単作区≥MS混作区≥M単作区となり, その合計である全体の乾物生産量は, M単作=MS混作>S単作となった。3作目では, 混作条件において形態的に個体の小さいソルガムの乾物生産量が, 単作条件の場合に比べて減少した。しかし個体の大きいトウモロコシは単作条件下に比べて増加したために, 混作条件下での乾物生産量が, 各作物種の単作時の単純合計値に比べて増加した。

雑草処理による差は作物乾物生産量と全体の乾物生産量の両者にみられ, 1作目, 2作目と同様に, 作物乾物生産量は除草区>雑草区となったが, 全体の乾物生産量は, 雑草乾物生産量の貢献により雑草区>除草区となった。

1作目と比較すると, メヒシバやセイタカアワダチソウ, イヌタデ, アキノエノコログサは多くの処理区で観察されたが, 1作目で優占していたメマツヨイグサやカヤツリグサはほとんど観察されなかった。また, 処理区間のばらつきが大きく, 有意な差ではなかったが, 不耕起区ではヒメムカシヨモギやセイタカアワダチソウなどの多年生植物が広く存在し, 耕起区ではメヒシバなどイネ科の一年生植物が広く存在した。このように作付の継続によって雑草種の構成に変化がみられた。

表6 耕うん方式、作付様式および雑草処理が3作目の乾物生産量に及ぼす影響。

要因			乾物生産量 (g/m ²)			
耕うん (T)	作付様式 (C)	雑草処理 (W)	作物	雑草	全体	
耕起	M	雑草	1185 ab	390 c	1575 a	
		除草	1305 a	—	1305 abc	
	S	雑草	322 de	580 a	902 abc	
		除草	762 abcde	—	762 c	
	MS	雑草	936 abc	642 abc	1578 ab	
		除草	1178 ab	—	1178 abc	
	不耕起	M	雑草	980 abc	441 bc	1420 ab
			除草	1141 abc	—	1141 abc
S		雑草	267 e	808 ab	1075 abc	
		除草	677 bcde	—	677 c	
MS		雑草	623 cde	537 abc	1160 abc	
		除草	895 abcd	—	895 bc	
耕うん方式 (T)		耕起		948 a	269	1216 a
		不耕起		764 b	298	1061 b
作付様式 (C)	W		1152 a	208 b	1360 a	
	B		507 c	347 a	854 b	
	WB		908 b	295 ab	1203 a	
雑草処理 (W)	雑草		719 b	—	1286 a	
	除草		993 a	566	993 b	
T×C			NS	NS	NS	
T×W			NS	—	NS	
C×W			NS	—	NS	
T×C×W			NS	—	NS	

注1) 同一英文字を付した平均値間には各要因内の比較において Tukey-Kramer の HSD 検定に 5% 水準で有意差がないことを示す。

注2) NS は分散分析の結果有意差がないことを示す。

注3) M はトウモロコシ単作, S はソルガム単作, MS はトウモロコシ・ソルガム混作をそれぞれ示す。

2. 窒素利用効率

植物体窒素含有率に要因による差はみられず, 作物窒素含有率は0.6%前後, 雑草窒素含有率は0.7%前後となった。各作付における, 作物と雑草を合計した全体の窒素利用効率を表7に示す。

1作目においては, 作物による窒素利用効率には雑草処理による差がみられたが, 雑草による利用率にばらつきが大きく, 全体の利用率には各要因による差がみられなかった。2作目における全体の窒素利用効率は, 乾物生産量と同様の傾向を示し, 雑草処理による差および, 耕うん方式と雑草処理の交互作用がみられた。また, 夏作である1作目では処理区全体の平均が約76%, 3作目では約77%だったのに対し, 冬作である2作目は約32%と低い利用効率を示した。これらの結果は乾物生産量に起因した。3作目では, 作付様式と雑草処理によって窒素利用効率に差がみられたが, 乾物生産量とは異なり耕うん方式による差はみられなかった。作付様式による差では, M-S-M区 = MS-WB-MS区 < S-B-S区の順に高い窒素利用効率を示した。

表7 耕うん方式, 作付様式および雑草処理が窒素利用効率に及ぼす影響.

要因			窒素利用効率 (%)				
耕うん (T)	作付様式 (C)	雑草処理 (W)	1 作目	2 作目	3 作目	3 作計	
耕起	M-W-M	雑草	75	25 ab	103 a	72 ab	
		除草	69	34 ab	73 ab	61 ab	
	S-B-S	雑草	74	33 ab	97 ab	69 ab	
		除草	69	30 ab	44 b	43 b	
	MS-WB-MS	雑草	98	33 ab	100 a	81 a	
		除草	76	31 ab	73 ab	60 ab	
	不耕起	M-W-M	雑草	-	44 a	104 ab	83 a
			除草	-	28 ab	70 ab	59 ab
S-B-S		雑草	-	47 a	73 ab	67 ab	
		除草	-	14 b	41 b	45 b	
MS-WB-MS		雑草	-	47 a	99 a	86 a	
		除草	-	20 b	57 ab	55 ab	
耕うん方式 (T)		耕起	-	31	80	64	
		不耕起	-	33	74	66	
作付様式 (C)	W	72	33	87 a	69 a		
	B	71	31	61 b	56 b		
	WB	87	33	82 a	70 a		
雑草処理 (W)	雑草	82	38 a	94 a	76 a		
	除草	71	26 b	60 b	54 b		
T×C		NS	NS	NS	NS		
T×W		NS	***	NS	NS		
C×W		NS	NS	NS	NS		
T×C×W		NS	NS	NS	NS		

注1) 同一英文字を付した平均値間には Tukey-Kramer の HSD 検定において 5%水準で有意差がないことを示す。

注2) ***は分散分析の結果0.1%水準で有意差があることを示し, NSは有意差がないことを示す。

注3) M-W-Mはトウモロコシ, コムギ, トウモロコシを, S-B-Sは, ソルガム, オオムギ, ソルガムを MS-WB-MSはトウモロコシ・ソルガム, コムギ・オオムギ, トウモロコシ・ソルガムを, 1作目, 2作目, 3作目それぞれに作付けたことを示す。

また, 2作目と同様に雑草区>除草区となり, 雑草を共生させ, 混作をおこなった処理区でも高い利用効率を示した。全窒素投入値 (38kgN/10a) に対する植物窒素固定量 3作合計の割合である3作計は作付様式と雑草処理によって窒素利用効率に差がみられた。この結果は3作目と同様の傾向を示し, 作付様式による差では M-S-M区 = MS-WB-MS区 < S-B-S区の順に高い利用効率を示し, 雑草処理では雑草区>除草区となった。このように, 全処理区間で差がみられなかった1作目を除き, 窒素利用効率は除草区よりも雑草区でより高い値を示し, また混作区が, 単作区と同等以上の窒素利用効率を示した。

3. 炭素固定量

植物体炭素含有率にも要因による差はみられず, 作物炭素含有率は42%前後, 雑草炭素含有率は40%前後となった。3作を合計した単位面積当たり作物, 雑草, 全体の炭素固定量の結果を表8に示す。作物炭素固定量には, 作付様式および雑草処理による差がみられた。作付様式

表8 耕うん方式, 作付様式および雑草処理が3作合計の単位面積当たり炭素固定量に及ぼす影響。

要因			炭素固定量 (g/m ²)			
耕うん (T)	作付様式 (C)	雑草処理 (W)	作物	雑草	全体	
耕起	M-W-M	雑草	925 abc	512 b	1437 ab	
		除草	1248 a	—	1248 abc	
	S-B-S	雑草	635 bc	795 a	1429 ab	
		除草	717 bc	—	717 c	
	MS-WB-MS	雑草	957 abc	642 ab	1599 a	
		除草	1104 ab	—	1104 abc	
	不耕起	M-W-M	雑草	938 abc	461 b	1399 ab
			除草	1134 ab	—	1134 abc
S-B-S		雑草	488 c	649 ab	1137 abc	
		除草	878 abc	—	878 bc	
MS-WB-MS		雑草	744 abc	524 b	1267 abc	
		除草	962 abc	—	962 bc	
耕うん方式 (T)		耕起		931	325 a	1256
		不耕起		857	272 b	1130
作付様式 (C)	W		1061 a	243 b	1304 a	
	B		680 b	361 a	1040 b	
	WB		942 a	291 b	1233 ab	
雑草処理 (W)	雑草		781 b	597	1378 a	
	除草		1007 a	—	1007 b	
T×C			NS	NS	NS	
T×W			NS	—	NS	
C×W			NS	—	NS	
T×C×W			NS	—	NS	

注1) 同一英文字を付した平均値間には Tukey-Kramer の HSD 検定において 5% 水準で有意差がないことを示す。

注2) NS は分散分析の結果有意差がないことを示す。

注3) M-W-M はトウモロコシ, コムギ, トウモロコシを, S-B-S は, ソルガム, オオムギ, ソルガムを MS-WB-MS はトウモロコシ・ソルガム, コムギ・オオムギ, トウモロコシ・ソルガムを 1 作目, 2 作目, 3 作目それぞれに作付けたことを示す。

による差では, M-W-M 区 = MS-WB-MS 区 > S-B-S 区となった。雑草処理による差では, 除草区 > 雑草区となった。最も作物炭素固定量の少なかった不耕起 S-B-S 雑草区では, 除草区と比較して平均値で約 44% 減少し, 雑草を共生させることにより最も作物炭素固定量が減少した。それ以外の処理区では, 平均値で 26% から 14% の減少がみられた。雑草炭素固定量には耕うん方式および作付様式による差がみられた。耕うん方式による差では, 雑草炭素固定量は耕起区 > 不耕起区となった。作付様式による差では, 作物炭素固定量とは逆に, S-B-S 区 > M-W-M 区 = MS-WB-MS 区となった。作物と雑草の合計値である全体の生産量は, 作付様式および雑草処理による差がみられた。作付様式による差では M-W-M ≧ MS-WB-MS ≧ S-B-S となった。雑草処理による差では雑草区 > 除草区となった。雑草区における雑草炭素固定量の割合は, 耕起区, 不耕起区とも M-W-M 雑草区で 35% 前後, S-B-S 雑草区で 40% 前後, MS-WB-MS 雑草区で約 56% 前後となり, 混作 × 雑草区で全体の炭素固定量に対する雑草炭素固定量の

割合が高くなった。

4. 土壌特性

1) 土壌窒素および土壌炭素含有率

実験開始前の圃場では、土壌窒素および土壌炭素含有率にすべての処理区間で差がみられず、処理区全体の平均値で、窒素含有率は0.2%、炭素含有率は3.6%となった。1作目の収穫後では、土壌窒素および土壌炭素含有率に処理間での差はみられなかったが、2作目の収穫後では、土壌炭素含有率に雑草処理による差がみられ、雑草区が平均で4.1%、除草区が3.6%となった。しかしこれ以降は処理間に有意な差がみられなかったことと、測定時期との相関がみられなかったことから、雑草区において雑草の根などが土壌サンプルに混入した可能性が考えられる。また、土壌窒素含有率については、採土時期の進行にともなって窒素含有率が上昇する傾向がみられた。これは各作付前に投入した窒素肥料による影響と考えられる。

本実験では土壌窒素および炭素含有率に処理による明確な変化がみられなかったが、より長期にわたる実験ではより大きな変化が起こるとい報告が多くある (Guzmanら2006, Morenoら2006, Wuestら2005, Logan 1990)。Tsujiら (in press) の実験においては、本実験地と同じつくば市の黒ボク土において、10年間継続して慣行耕起、不耕起を行った結果、土壌無機態窒素が不耕起区で慣行耕起区よりも高い値を示した。そのため本実験においても、作付けを継続していくことにより処理間の差が拡大していく可能性がある。

2) 土壌貫入抵抗および土壌水分含有率

実験開始前および各作付終了後の計4回、土壌貫入抵抗を測定した。実験開始前は、圃場全体を均一に耕うんしたため、土壌貫入抵抗は要因による差がみられず、地表面では全処理区の前平均値で0.18MPa/cm³、地表面から深さ5cm地点では0.26MPa/cm³となった。耕うん方式による差は、処理の行われた2作目収穫後と3作目収穫後の両期間でみられた。2作目収穫後では、土壌貫入抵抗は深さ5cm層まで不耕起区>耕起区となり、3作目収穫後では深さ20cm層まで不耕起区>耕起区となった。これは、耕起区では作付けごとに土壌が繰り返し膨軟になるのに対して、不耕起区では作付けの進展にともなって土壌が圧密されたためと考えられる。また雑草処理によっても差がみられ、2作目収穫後、3作目収穫後において深さ5cm、10cmで、土壌貫入抵抗が雑草区>除草区となった。これは雑草区に存在した雑草の根による影響と推察される。

1作目収穫後、3作目収穫後の計2回土壌体積水分比を測定した。1作目収穫後の深さ12cm層では、作付様式と雑草の有無による差はみられなかった。このため3作目収穫後では、深さ12cm層に加えて深さ20cm層における土壌体積水分比も測定した。処理間に有意差のあった3作目の収穫後の土壌体積水分比(%)を表9に示す。3作目収穫後の土壌体積水分比は、1作目と同様に作付様式と雑草処理による差はみられなかったが、耕うん方式による差がみられ、深さ12cmと20cmの両層で、不耕起区>耕起区となった。これは、不耕起区が耕起区よりも高い土壌貫入抵抗を示したように、不耕起では土壌が圧密状態になっていたためと考えられる。

3) 中型土壌動物の動態

3作を通じて、蜘蛛網では陰気門ダニ亜目が多く観察された。ついで、昆虫網のトビムシ類が多く観察された。これらの2目以外に、クモ目やコムシ目、鞘翅類、アリ類、鞘翅類・双翅

表9 耕うん、作付様式および雑草処理が3作目収穫後の土壌水分に及ぼす影響。

要因			体積水分比 (%)		
耕うん方式 (T)	作付様式 (C)	雑草処理 (W)	深さ12cm	深さ20cm	
耕起	M	雑草	13.7 bc	17.0 c	
		除草	11.3 c	13.5 c	
	S	雑草	11.3 c	15.0 c	
		除草	10.0 c	16.0 c	
	MS	雑草	11.7 c	14.0 c	
		除草	14.3 bc	18.7 bc	
	不耕起	M	雑草	24.0 a	28.8 a
			除草	20.3 ab	24.5 ab
S		雑草	22.8 a	25.8 a	
		除草	19.7 ab	26.7 a	
MS		雑草	23.5 a	29.5 a	
		除草	23.3 a	26.2 a	
耕うん (T)		耕起	12.1 b	15.7 b	
		不耕起	22.3 a	26.9 a	
作付様式 (C)	W	17.3	21.0		
	B	16.0	20.9		
	WB	18.2	22.1		
雑草処理 (W)	雑草	17.8	21.7		
	除草	16.5	20.9		
T×C		NS	NS		
T×W		NS	NS		
C×W		NS	NS		
T×C×W		NS	NS		

注1) 同一英文字を付した平均値間には Tukey-Kramer の範囲検定において5%水準で有意差がないことを示す。

注2) NSは分散分析の結果有意差がないことを示す。

類・鱗翅類幼虫なども観察された。

中型土壌動物個体群密度の全数の各作付期間内での推移を図1に示す。分類された種類間での差がみられず、また作付様式の影響も認められなかったため、図では全個体の値を、作付様式を込みにして示す。

1作目、3作目(夏作)では、時間の経過に伴い個体群密度が増加する傾向がみられた。2作目(冬作)では、2月に最も個体群密度が減少したが、3月には1月と同程度になり、4月、5月は3月よりも増加した。このように時間の経過にともなう個体群密度の変動がみられた。土壌動物の個体群密度に季節変動があり、それは生息する種類の変化によるところが大きいという報告がある(Irmler in press)ため、本実験で観察されたこれらの変動も、季節の変化による生息種の変化に影響をうけているためである可能性がある。このような変動は耕起区で明確にみられる傾向があったが、これは耕起区が不耕起区よりも気温の変化を受けやすい(Tsujiら in press)ことも一因として考えられる。

中型土壌動物は、1作目、3作目では0週目から4週目まで全処理区が低い個体群密度を示したが、これは全処理区が均一に耕起されたためと考えられる。6週目以降は収穫後(14週

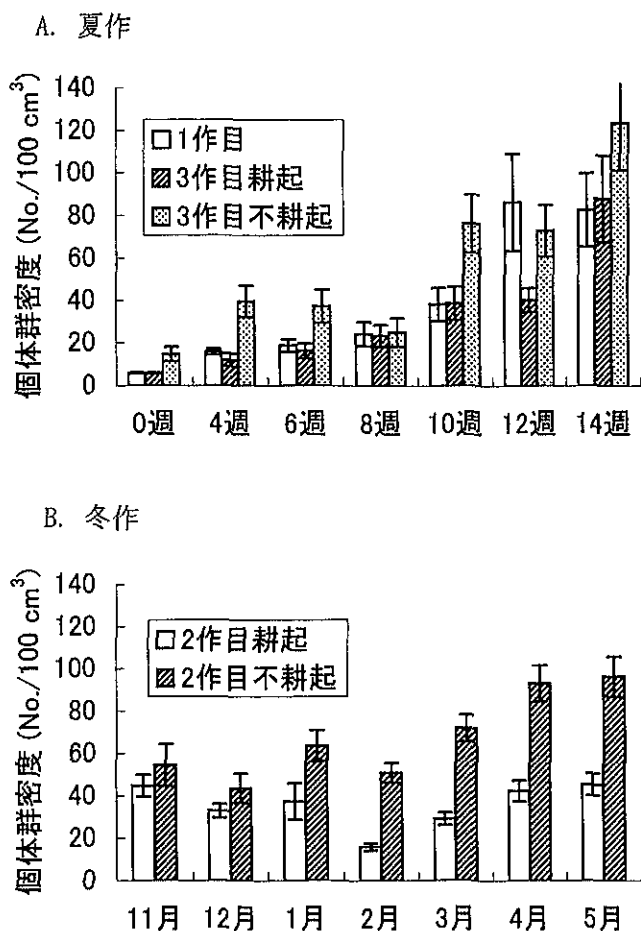


図1 夏作および冬作における耕うん方式ごとの中型土壤動物個体群密度の推移。

目)まで増加した。これは、4週目までは雑草および作物が生育初期の段階にあり、土壤環境に処理区間で顕著な差がみられなかったためと推察された。2作目における耕うん方式の違いによる処理区間の差は、11月と12月の調査ではみられなかったが、1月以降のすべての時期で不耕起区>耕起区となり、不耕起区では、作付けの進行にともなって個体群密度が耕起区よりも急激に増加する傾向がみられた。これは、不耕起区では土壤構造が攪乱される程度が小さく、土壤動物が受ける損傷が比較的軽微であったことが増殖に有利に働いたと考えられる。Kladivko (2001)によれば、慣行耕起処理下では、耕起による物理的攪乱で土壤動物が機械的損傷をうけることや、土壤水分、地表面から植物残渣等が撤去されることによって、不耕起処理下よりも土壤動物個体数が減少することが多く報告されている。また、不耕起圃場において、土壤水分含有量の上昇に伴い慣行耕起圃場におけるよりも土壤動物個体数が増加する(Mac Garry 1997)という報告もあり、これは本研究での結果と一致する。

雑草処理の違いにより、全ての作付けにおける個体群密度が雑草区>除草区となる傾向がみられた。これは雑草区の地表付近に、ササラダニなどの土壤動物が食物や住処とすることができる生育雑草やその枯死部が集積したためと推察される。

5. 総合考察

本実験の条件下では、作物のみの乾物生産量は除草区>雑草区となったが、全体の乾物生産量は雑草区>除草区となり、単作と比較した場合、雑草を含めた系で単位面積当たりの乾物生産量が増大した。作付様式の違いによる影響と同様、複数の植物種が存在する混合群落においては補完的に養分吸収が行われ、単独の種のみ存在する純群落の生産量を上回る場合があることは広く知られている (Loomis and Connor 1992)。

3作計の窒素利用効率も雑草区で高くなり、雑草との混合群落においてより効率的に養分吸収が行われたことが示唆された。これは地上部や根の形態、または生育期間の違う植物種が同一の圃場に共存することによって光や養分などの資源を有効に利用できる (Tilman ら1996)、可能性があるため、植物種が1種類のみでは吸収しきれなかった土壌中の養分を複合的に吸収したと考えることができる。西尾 (2005) は、生産と環境保全を両立させるために施肥養分の利用効率 (利用率) を向上させて、環境に流出する養分を減少させるという方法を提案している。また、一つの植物種が捉えた養分を後日他の植物種が利用することができる (Aga-mathu and Broughton 1985) ことから、一時的に作物の利用分を減少させることになった雑草による吸収養分を時間差で有効利用し、結果として土壌からの取奪分を減少させる方式の提案も可能であると考えられる。具体的な方法としては、畑作物-雑草共生系において適当な時期に雑草を鋤き込むことによって、雑草の吸収した養分を有効利用することなどが考えられる。そのためには、雑草によって吸収された窒素分が鋤き込みによってどの程度有効利用されるのかについても調べる必要がある。

また、雑草を共生させることで、単位面積当たりの炭素固定量も増加した。腐植などの土壌有機物は、土壌の養分と水分を植物に供給する能力や、それを保持する能力に大きく関わっており (米林 1997)、植物の生育に不可欠であること以外に、最近では大気中の余剰炭素の固定源としても注目されている。余剰炭素の観点からは、地球温暖化問題への解決要請を受けて、土壌炭素量をいかに増加させるかという耕地を対象とした研究 (Lal 1997) が行われている。しかし作物-雑草共生系において固定可能な草本は、樹木と比較して分解が速やかに進行する。そのため長期的視点で土壌炭素の増加を目指すためには、植物遺体の管理法、鋤き込み法などを検討する必要がある。

さらに雑草区において中型土壌動物の個体群密度が増加する傾向がみられた。中型土壌動物は植物遺体の一次分解に関与するものが多く (木村 1997)、またより大型の動物の被食者でもあることから、雑草共生の継続によって、圃場内の生物種の構成にも変化が起こる可能性があると考えられる。

以上の結果より、作物と雑草を共生させることによって、環境負荷を低減する生産システムにとって複数の利点が得られる可能性がある。しかし、本実験では作付けの進行に伴う雑草種や土壌環境の変化が観察され、長期間この管理方式で生産を続けた場合には、耕作に障害となる多年草などが生息する可能性がある。そのためこの管理方式で作物生産を長期間成立させるためには、本実験では放任とした雑草量の制御や、作物生産量と雑草生産量の割合の管理などを検討する必要があると考えられる。一方、本実験において不耕起処理により発生する雑草の種類および現存量に差がみられたことから、耕うんなどの管理技術を雑草制御に活用できると考えられる。今後さらに以上のような検討を重ね、耕作放棄地などに適用できる省力的な方法として提案したい。

謝 辞

本研究を遂行するに際して、筑波大学大学院生命環境科学研究科 林 久喜助教授には実験計画の立案およびデータ解析でご教示いただいた。筑波大学作物生産システム学研究室の院生・学類生、および農林技術センター作物生産技術班の技術職員の方々にもさまざまな面でご支援をいただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Agamathu, P. and W.J. Broughton 1985. Nutrient Cycling within the Developing Oil Palm-Legume Ecosystem. *Agric. Ecosyst. Environ.* 13: 111-123.
- Alvarez, A., G.K. Frampton and D. Goulson 2001. Epigeic Collembola on Winter Wheat under Organic, Integrated and Conventional Farm Management Regimes. *Agriculture Ecosystems and Environ.* 83: 95-110.
- 青木潤一 1999. 図解検索. 青木潤一編, 分類のための図解検索. 東海大学出版, 東京. 1-40.
- Bilalis, D., P. Efthimiadis, and N. Sidiras 2001. Effect of Three Tillage Systems on Weed Flora in a 3-year Rotation with Four Crops. *J. Agronomy and Crop Sci.* 186: 135-141.
- Doran, J.W. and M.R. Zeiss 2000. Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *App. Soil. Ecol.* 15: 3-11.
- Fente, E., S.A. Suarez., C.M. Ghersa, and R.J.C. Leon 1999. Soybean Weed Communities: Relationships with Cultural History and Crop Yield. *Agron. J.* 91: 234-241.
- Gill, K.S. and M.A. Arshad 1995. Weed Flora in Early Growth Period of Spring Crops under Conventional, Reduced, and Zero Tillage Systems on a Clay Soil in Northern Alberta, Canada. *Soil Till. Res.* 33: 65-79.
- Gormsen, D., K. Hedlund and W. Huihu 2006. Diversity of Soil Mite Communities When Managing Plant Communities on Set-Aside Arable Land. *App. Soil Ecol.* 31: 147-158.
- Guzman, J.G., C.B. Godsey, G.M. Pierzynski, D.A. Whitney and R.E. Lamond 2006. Effects of Tillage and Nitrogen Management on Soil Chemical Properties after 23 years of Continuous Sorghum. *Soil and Till. Res.*
- 原田 洋 1995. 土壤動物. 青木潤一ら編, 土の中の生き物. 築地書館, 東京. 38.
- Irmiler, U. Climatic and Litter Fall Effects on Collembolan and Oribatid Mite Species and Communities in a Beech Wood Based on a 7 years Investigation. *Soil Biol. (In Press)*
- Jolliffe, P.A. and F.M. Wanjau 1999. Competition and Productivity in Crop Mixtures: Some Properties of Productive Intercrops. *J. Agricultural Sci.* 132: 425-435.
- 環境省 2000. 植物レッドリストおよびレッドデータブック, http://www.biodic.go.jp/rdb/rdb_f.html (2000年12月刊行)
- 木村真人 1997. 土壌の生物性. 最新土壌学, 久馬一剛編. 朝倉書店, 東京. 57.
- Kladivko, E.J 2001. Tillage Systems and Soil Ecology. *Soil. Till. Res.* 61: 61-76
- 小松崎将一 2000. 輪作と作付体系. 速藤織太郎編, 持続的農業システム管理論. 農林統計協会, 東京. 108-109.
- Lal, R 2003. Global Potential of Soil Carbon Sequestration to Mitigate the Greenhouse Effect. *Critical Reviews in Plant Sci.* 22: 151-184.
- Logan, T.J 1990. Chemical Degradation of Soil. Ed. By Lal, R., and B.A. Stewart, *Advances in Soil Science.* Belhaven Press, New York. 185-221.
- Loomis, R.S. and D.J. Connor 1992. 群落の概念. 堀江 武・高見晋一監訳, 食糧生産の生態学 環境問題の克服と持続的農業に向けて. 農林統計協会, 東京. 46-81.
- McGarry, D 2000. Contrasting Soil Physical Properties after Zero and Traditional Tillage of an Alluvial Soil in the Semi-arid Subtropics. *Soil and Till. Res.* 53: 105-115.

- Marshall, E.J.P., V.K. Brown, P.J.W. Lutman, G.R. Squire, and L.K. Ward 2003. The Role of Weeds in Supporting Biological Diversity within Crop Fields. *Weed Res.* 43: 77-89.
- 宮崎 毅 1998. 耕起と不耕起. 環境土壌学編集委員会編, 豊かな土づくりを目指して - 環境土壌学 -. 農業土木学会, 東京. 132-137.
- Moreno, F.J.M. Murillo, F. Pelegrin and I.F. Giron 2006. Long-Term Impact of Conservation Tillage on Stratification Ratio of Soil Organic Carbon and Loss of Total and Active CaCO₃. *Soil and Till. Res.* 85: 86-93.
- Nakamoto, T., J. Yamagishi and F. Miura 2006. Effect of Reduced Tillage on Weeds and Soil Organisms in Winter Wheat and Summer Maize Cropping on Humic Andosols in Central Japan. *Soil and Till. Res.* 85:94-106.
- 西尾道徳 2005. 化学農薬の普及. 西尾道徳著, 農業と環境汚染. 農山漁村文化協会, 東京. 36-40.
- 西尾道徳 2005. 施肥量と養分の利用効率の関係. 西尾道徳著, 農業と環境汚染. 農山漁村文化協会, 東京. 79-84.
- Noti, M.I., H.M. Andre and M. Dufrene 1996. Soil Oribatid Mite Communities (Acari: Oribatida) from high Shaba (Zaire) in Relation to Vegetation. *App. Soil. Ecol.* 5: 81-96.
- 佐合隆一 1999. 雑草防除. 日本農作業学会編, 農作業学. 農林統計協会, 東京. 292.
- Skorda, E., A. Zamanis and P. Efthimiadis 1997. A Long Term Study on Effect of No-Tillage on Weed Development and Yield of Continuous Wheat and Barley. *British Crop Protection Council, Proc. Brighton Crop Protection Conf., Brighton, UK.* 1-51.
- Tilman, D., D. Wedin and J. Knops 1996. Productivity and Sustainability Influenced by Biodiversity in Grassland Ecosystems. *Nature.* 379: 718-720.
- 富永 達 2005. 雑草の生活史. 石井龍一編, 環境保全型農業辞典. 丸善, 東京. 440-441.
- Tsuji, T., H. Yamamoto, K. Matsuo and K. Usuki The Effects of Long-term Conservation Tillage, Crop Residues and P Fertilizer on Soil Conditions and Responses of Summer and Winter Crops on an Andosol in Japan. *Soil Till. Res.* (In press)
- 渡辺弘之 1979. 観察の手順. 渡辺弘之ら編, 土壌動物の生態と観察. 築地書館, 東京. 8.
- Wuest, S.B., T.C. Caesar-TonThat, S.F. Wright and J.D. Williams 2005. Organic Matter Addition, N, and Residue Burning Effects on Infiltration, Biological, and Physical Properties of an Intensively Tilled Silt-Loam Soil. *Soil and Till. Res.* 84: 154-167.
- 山本泰由 2005. 作付様式. 石井龍一ら編, 環境保全型農業辞典. 丸善, 東京. 360-362.
- 米林甲陽 1997. 土壌の有機物. 最新土壌学, 久馬一剛編. 朝倉書店, 東京. 41-53.

An Approach to Construct the Fundamental Knowledge of the Crop Production Systems for Decreasing Environmental Impacts Based on the Polyculture with Crop-weed

Ryoko HARA and Naoki SAKAI *

Graduate school of Life and Environmental Science, University of Tsukuba, Ten-nodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572

Abstract

To establish a crop production systems for decreasing environmental impacts, there is a need to propose a new polyculture ecosystem that has other plants than a subject crop. Objective of this study was to consider the effect of the crop-crop, crop-weed co-existence polyculture on the aboveground carbon and nitrogen fixation and the soil environment. Experiments were carried out at three cropping seasons from 2002 to 2003. Experimental factors were tillage system, cropping pattern, and weed management. The polyculture (crop + weed) decreased crop yield, but increased the total aboveground fixations of carbon and nitrogen. Soil mesofauna was increased by no tillage and polyculture. Consequently, it was required a method which can control voluntarily the amount of weed on a field to develop a crop-weed co-existence production system.

Key words: Biodiversity, Carbon fixation, Crop-weed co-existence production system, Soil mesofauna, Sustainable agriculture

* Corresponding Author: nsakai@sakura.cc.tsukuba.ac.jp