

栃木県の二毛作水田における有機物連用が土壌 および作物生育に及ぼす影響

小林靖夫¹⁾・鈴木聡・渡邊修孝²⁾・吉沢崇³⁾・植木与四郎⁴⁾・
鈴木智久⁵⁾・金田晋平⁶⁾

摘要: 栃木県農業試験場栃木分場の灰色低地土水田において、有機物（稲わら、麦わら、稲わら堆肥ならびに麦わら堆肥）を26年間連続施用し、水稻および二条大麦の生育収量および土壌の理化学性への影響を調査した。有機物を長期連用して二毛作栽培することにより、土壌の物理性では膨軟性を維持する効果が確認され、化学性では、腐植（全炭素）の集積、可給態窒素の増大や塩基類の集積が認められた。また、有機物の施用が収量に及ぼす影響については施用初期では判然としないが、連用年数が長くなるに伴い三要素区より増収した。特に堆肥区で作物に対する窒素供給量が高まり、収量指数は増加する傾向を示した。

これらの結果から、本県において推進している稲わら、麦わらすき込みおよび堆肥施用は、二毛作水田の地力維持および収量の安定に寄与できることが明らかとなった。

キ-ワ-ド: 灰色低地土水田、有機物、長期連用、堆肥

Effect of long-term organic matter application to double-cropping paddy fields on rice and barley yields in Tochigi prefecture

Yasuo KOBAYASHI, Satoshi SUZUKI, Nobutaka WATANABE, Takashi YOSHIZAWA,
Yoshirou UEKI, Tomohisa SUZUKI and Shimpei KANEDA

Summary: We studied the effect of 26-years successive application of organic matter (rice and barley straw or straw compost) in a Gray lowland soil paddy field on the growth and yield of rice and barley, and on the physical and chemical properties of the soil. Long-term continuous application of organic matter resulted in the maintenance of soil porosity, accumulation of humus (total carbon), increase in soil nitrogen (nitrogen-supplying potential of soil), and deposition of bases. Yield was higher in the plot that had received successive applications of organic matter than in the non-organic matter plot. Although the benefit of organic matter on yield was not clear in the first year, the compost plot showed a trend of increasing in yield every year. Successive application of organic material resulted in higher levels of nitrogen in the compost plot than in the non-organic matter plot.

Tochigi Prefecture recommends the application rice and barley straw or straw compost to farmers. The results of this study confirm that these methods are effective for the maintenance of the fertility, and result in increased yields of rice and barley.

Key words: Gray lowland soil paddy fields, organic substance, long-term successive application, compost

1)現栃木県農業環境指導センター, 2)現安足農業振興事務所, 3)現畜産振興課, 4)現生産振興課, 5)現河内農業振興事務所, 6)現経営技術課

緒言

安定した農業生産性を持続するためには、地力(土壌生産力)を高めることが不可欠であり、その手段として有機物の施用が挙げられる。有機物の施用効果は、土壌物理性の改善、肥料成分による土壌の化学性の向上、土壌の生物相を豊富にする生物性の改善の3点が知られている。

本県における水稲、麦の二毛作栽培は、県南部を中心に盛んに行われている。その栽培の中で、有機物補給の面の稲わら、麦わらの有効利用が挙げられるが、生産現場においては、麦わらの場合、収穫直後に焼却してしまう例が見られる。その理由は、麦わらをすきこんだ場合、跡作水稲における代かきおよび田植え時に困難をきたすことや、水稲移植後の生育阻害物質の発生あるいは窒素飢餓による初期生育の抑制があげられる^{3,7)}。しかし、麦わら施用による水稲の玄米収量は、あまり影響を受けず^{11,14)}しかも、地力の維持向上を図る上では、稲わら、麦わらなどの有機物施用が有効であり^{14,17)}、また現在の機械化体系の中では、有機物の補給に、生わらの還元が最も容易であると考えられる。

作物に吸収される窒素のうち60~70%は土壌中の有機物から出てくる土壌窒素^{7,18)}である。したがって、化学肥料のみの連用は、長期的にみると地力の消耗を招き、土壌の窒素供給力が低下し、収量が低下しやすい。また、同一ほ場で水田と畑を繰り返す二毛作水田は、水稲単作に比べて地力を

消耗しやすいと考えられる。

本研究では、水田土壌として県南部に広く分布している灰色低地土を対象に、二毛作水田における有機物(稲わらおよび麦わら、稲わらおよび麦わら堆肥)の長期連用試験を行い、土壌の理化学性と水稲および二条大麦の生育、収量に及ぼす影響について検討した。なお、本報告は1977年から2003年までの26年間の成績をとりまとめたものであり、有機物の長期連用効果を明らかにすることを目的とした土壌保全対策事業「土壌環境基礎調査・基準点調査」の中で実施されたものである。

試験方法

1. 土壌条件

調査ほ場は、栃木県農業試験場栃木分場の水田ほ場である。ほ場の来歴は、1973年に約1mの切土を行った後ほ場整備をし、1973年および1974年に大豆、1975年から水稲、二条大麦の栽培を行った。試験開始前年度の1976年は、ほ場の均一性を確認するため同一施肥管理で栽培を行い、有機物を施用しなかった。1977年から有機物連用試験を開始し、2003年までの26年間にわたり水稲および二条大麦を栽培した。試験開始初年(以下、試験開始時)である1976年の土壌の主な理化学性を第1表に示した。細粒灰色低地土、灰褐色系(金田統)で、切土の影響により、作土の地力は低い。

第1表 試験開始時(1976年)の土壌理化学性

層位	深さ cm	細 土 無 機 物 中 %					土性
		粗砂	細砂	砂合計	シルト	粘土	
1	(0 ~ 12)	11.0	43.1	54.1	29.1	16.8	CL
2	(12 ~ 25)	10.2	44.5	54.7	29.0	16.2	CL
3	(25 ~ 42)	9.6	49.3	58.9	33.5	8.6	L
4	(42 ~)	0.9	38.1	39.0	45.8	15.2	SicL

層位	三相分布 %			孔隙率 %	仮比重
	固相	液相	気相		
1	46.2	46.8	7.0	53.8	1.22
2	50.1	45.9	4.0	49.9	1.04
3	53.0	45.0	2.0	47.0	1.37
4	35.7	52.3	12.0	64.3	0.93

層位	pH (H ₂ O)	T-C %	T-N %	C/N	CEC me/100g	可給態リン酸 mg/100g		交換性塩基(mg/100g)			リン酸 吸収係数
						Bray	Truog	CaO	MgO	K ₂ O	
1	6.5	1.96	0.10	19.6	16.6	6.85	3.29	172	10	7	1156
2	6.7	1.25	0.08	15.6	17.5	5.67	-	160	10	5	1151
3	6.7	2.35	0.14	16.8	15.2	1.12	-	193	10	2	1134
4	6.7	2.78	0.16	17.4	-	-	-	-	-	-	1344

2. 試験区の構成

第2表に試験区の処理内容を、第3表に施用有機物の成分含有率を示した。試験は、無窒素区(窒素を除く施肥量は三要素区と同じ)、三要素区(窒素(N),リン酸(P₂O₅),加里(K₂O)を施用)、稲わら区、稲わら麦わら区、堆肥区(稲わら、麦わら)を設置し、1区の面積を0.4aとして2連制で行った。肥料は、水稻はNを塩安、P₂O₅を熔りん、K₂Oを塩加で施用した。二条大麦はNを硫酸、P₂O₅を熔りん、K₂Oを塩加で施用した。各区とも県の施肥基準量を施用し、稲わら区および稲わら麦わら区、堆肥区は三要素区の施肥量に上乘せして施用した。稲わら区は、収穫後の10月~11月に10~15cm程度に切断した稲わらを作土層にすきこんだ。稲わら麦わら区は、稲収穫後の10月~11月に稲わらを、麦収穫後の6月に10~15cm程度に切断した麦わらを施用した。堆肥区は、水稻作付け前の6月に麦わら堆肥を、大麦作付け前の10月に稲わら堆肥を施用した。

3. 耕種概要

栽培体系を第1図に示した。水稻の供試品種は日本晴(1977~1982年)および星の光(1983~2002年)を用い、慣行に準じて箱育苗した。移植は6月20日前後に手植えにより行った。栽植密度は30×15cm(22.2株/m²1株5本植)とし、10月10日~20日に収穫した。施肥は、堆肥を荒代かき時、基肥を植え代かき時に行い、穂肥を8月15日頃行った。病害虫防除などの一般管理は、当地区における慣行栽培に準じて行った。なお、各試験区は、けい畔枠で仕切り、施用した有機物や肥料が移動しないようにした。

二条大麦の供試品種はアズマゴールデン(1977~1981年)、ミカモゴールデン(1982~1997年)、タカホゴールデン(1998~1999年)、スカイゴールデン(2000~2002年)を用いた。播種は、ドリルシーダーを用いて条間20cmで11月5日前後に行い、翌年の6月5日前後に収穫した。病害虫防除などの一般管理は、当地区における慣行栽培に準じて行った。

第2表 試験区の処理内容

(kg/10a)

処理区	二条大麦		化学肥料施肥量			有機物由来成分量				
	有機物 堆肥	稲わら	基肥			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O					
三要素区			6.5~7	7	6~7					
稲わら区	490~1000		6.5~7	7	6~7	4.3	1.3	11.8	1.7	1.0
稲わら麦わら区	490~1000		6.5~7	7	6~7	4.3	1.3	12.4	1.7	0.9
堆肥区	1000~2000		6.5~7	7	6~7	13.2	21.1	18.4	21.3	16.2

処理区	水稲		化学肥料施肥量				有機物由来成分量					
	有機物 堆肥	麦わら	基肥			追肥		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	K ₂ O					
無窒素区			0	10	6~7	0	2~3					
三要素区			4~7	10	6~7	3~4	2~3					
稲わら区			4~7	10	6~7	3~4	2~3					
稲わら麦わら区	287~582		4~7	10	6~7	3~4	2~3	1.2	0.6	7.9	1.2	0.6
堆肥区	1000~2000		4~7	10	6~7	3~4	2~3	9.1	22.1	14.3	23.4	12.0

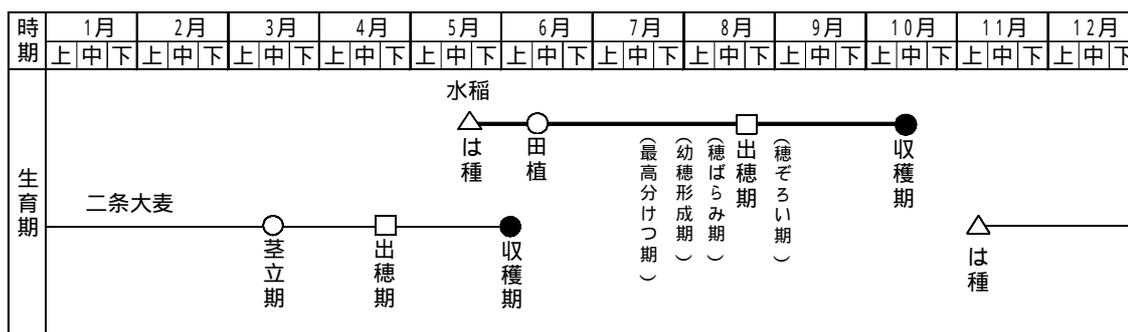
注)有機物由来成分量は、1977年から2002年までの平均値

第3表 有機物の現物中成分含有率(%)

有機物	乾物	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
稲わら	80.0	0.67 (0.09)	0.21 (0.09)	1.91 (0.36)	0.28 (0.08)	0.15 (0.04)
麦わら	80.0	0.36 (0.10)	0.15 (0.07)	2.06 (0.64)	0.35 (0.11)	0.16 (0.05)
堆肥区(稲わら)	40.8 (7.04)	1.32 (0.48)	2.11 (1.22)	1.84 (0.73)	2.13 (0.83)	1.62 (0.50)
堆肥区(麦わら)	40.1 (5.96)	0.91 (0.55)	2.21 (0.96)	1.42 (0.79)	2.35 (0.98)	1.20 (0.52)

注1.1977年から2002年までの平均値

2.()は標準偏差



第1図 水稻, 二条大麦栽培体系

4. 試料採取および成分の分析調査

水稻収穫後および二条大麦収穫後に作土層を採取し、理化学性を測定した。作物体は、水稻は分けつ初期, 最高分けつ期, 幼穂形成期, 出穂期, 成熟期に、二条大麦は成熟期にそれぞれ抜き取り養分吸収量を調査した。

土壌, 作物, 堆肥などの分析は、「土壌環境基礎調査における土壌, 水質及び作物体分析法」¹⁰⁾または「堆肥等有機物分析法」²²⁾により実施した。

試験結果および考察

1. 土壌物理性の変化

有機物を25年間連用した跡地土壌の物理性を第4表に示した。試験開始時の作土は、固相率46.2%, 気相率7.0%であった。これに対し、無窒素区や三要素区は、固相率が46.5~49.2%に増加し、気相率は2.4~3.8%に減少し、膨軟性が低下する傾向を示した。一方、稲わら区、稲わら麦わら区や堆肥区は、固相率が45.1~43.0%, 気相率が4.6%であった。気相率は試験開始時の7.0%から減少しているものの、無窒素区や三要素区ほど減少せず、また、固相率も減少していることから土壌の膨軟性の維持に効果的であった。このことから、気相率および孔隙率を維持するためには、堆肥や稲わらの連用が必要であることが示された。また、本試験の供試土壌と同様に、細粒黄色土や中粗粒灰色低地土においても有機物を連用することにより、固相率の減少や孔隙率の増加が認められたとの報告がある^{5, 6, 13, 14)}。したがって、ほとんどの土壌が有機物連年施用により、物理性改善効果があると考えられた。

第4表 作土の物理性の変化(25作目 2001年水田後)

処理区	三相分布 %			孔隙率 %	仮比重
	固相	液相	気相		
無窒素区	49.2	48.4	2.4	50.8	1.27
三要素区	46.5	49.8	3.8	53.6	1.20
稲わら区	45.1	50.3	4.6	54.9	1.17
稲わら麦わら区	45.3	50.1	4.6	54.7	1.20
堆肥区	43.0	52.4	4.6	57.0	1.10

2. 土壌化学性の変化

25年目水田跡地土壌の化学性を第5表に示した。pHは5.3~5.7で各区とも同程度であり、試験開始時より低下している。CECも14.8~17.1me/100gであり各区とも同程度であった。全窒素は試験開始時に0.10%であったものが0.14~0.19%に増加し、全炭素も1.96%であったものが有機物施用区では1.82~2.55%となり維持またはやや増加した。可給態リン酸は、無窒素区、三要素区およびわら類が、8.5~10.6mg/100gで同程度であったのに対し、堆肥区では、19.2mg/100gとなり増加した。稲わら麦わら区で可給態リン酸が低かった。これは、麦作に稲わら施用した後、易分解性有機物を分解するためにリン酸の不可給化が起きると考えられるが、条件を整えて検討する必要がある。交換性カルシウム (CaO) は74~236mg/100gで全区で増加したが、わら類の施用では増加程度が小さかった。交換性マグネシウム (MgO) は全区で21~33mg/100gとなり増加した。交換性加里 (kO) は全区で21~29mg/100gと増加し、稲わら麦わら区が最も高かった。高橋・千葉¹⁰⁾も同様の結果を報告しており、その中でカルシウム、マグネシウムの低下は、土壌還元の進行、有機酸、キレート物質の生成などによる溶脱であるとし、石灰質資材の併用を進めている。本研究の結果からも、このことが確認された。また、作土層の交換性加里の増加は、わら類からの放出によるものと考えられた。

第5表 作土の化学性的変化(25作目 2001年水田後)

処理区	pH (H ₂ O)	T-C %	T-N %	C/N	CEC me/100g	可給態リン酸 mg/100g	交換性塩基 (mg/100g)		
							CaO	MgO	K ₂ O
無窒素区	5.7	1.72	0.14	12.1	15.2	10.6	236	33	26
三要素区	5.5	1.78	0.15	11.9	14.8	9.2	201	25	22
稲わら区	5.4	1.82	0.15	11.8	14.5	9.3	174	22	21
稲わら麦わら区	5.3	1.87	0.16	11.7	14.8	8.5	183	21	29
堆肥区	5.5	2.55	0.19	13.3	17.1	19.2	233	32	27

処理区	可給態窒素 (mg/100g)			バイオマス窒素 ³⁾ mg/100g	バイオマス窒素/ 可給態窒素 %	腐植 ⁴⁾ MI
	畑作 ¹⁾	水田 ²⁾	畑作 ²⁾			
無窒素区	4.2	5.8	4.5	2.6	61.7	1.73
三要素区	5.6	7.3	5.6	5.4	95.7	1.73
稲わら区	6.4	7.1	5.7	6.3	97.8	1.74
稲わら麦わら区	7.4	8.8	5.7	6.9	93.4	1.76
堆肥区	8.4	9.6	7.8	6.5	69.1	1.77

- 注 1. 24作目 2000年二条大麦跡
 2. 26作目 2002年二条大麦・水稲跡
 3. バイオマス窒素は、土壌をクロロホルムくん蒸して菌体を死滅させ、塩化カリウムで抽出可能な状態とし、定法に従って定量
 4. 25作目 2001年水稲跡 腐植 MIは、0.5%水酸化ナトリウム溶液抽出物の450nmの吸光度 / 520nmの吸光度

26作後の跡地土壌を水田状態および畑状態で30-4週間室内培養し、可給態窒素を算出し第5表に示した。水稲、二条大麦作後の跡地で、堆肥区 > 稲わら麦わら区 > 稲わら区 > 三要素区 > 無窒素区の順となり、堆肥区は、三要素区に対し、約2mg/100g程度上回る結果となった。水田における窒素肥沃土が、水稲の収量に大きな影響力を持っており、有機物の施用は土壌中に窒素および炭素を集積させ、地力窒素が増大し、土壌を肥沃化することが知られている。堆肥区は、無窒素区、三要素区に比べ、窒素供給力が大きく、そのため生育が良好で、収量も増大したと考えられる。

24作目の二条大麦跡地土壌のバイオマス窒素を測定し第5表に示した。バイオマス窒素は菌体由来の窒素であり、代謝速度が速い。また、可給態窒素の半分以上を占め、水稲の生育後半にはバイオマス窒素が利用されているとの報告がある。作物の生育後半の窒素供給には、可給態窒素中のバイオマス窒素が大きく貢献している可能性が高い。三要素、稲わら、稲・麦わら区のバイオマス窒素/可給態窒素比は90%以上であったが、堆肥区は約70%であった。堆肥は菌体の他に各種有機態窒素画分を含むため¹⁹⁾、可給態窒素中のバイオマス窒素の割合が低いと考えられた。

腐植の変化について第5表に示した。腐植の質的な変化についてMelanic Index(MI)⁴⁾から検討した。水酸化ナトリウム水溶液により抽出した腐植液の450nm, 520nmの吸光度を測定し、その比を求めた。MIから腐植酸の型を推定するとA型はMI 1.7, B型は1.7 < MI 2.0, P, Rplは2.0 < MIであるが、本研究のすべての区は1.7 < MI 2.0となり、質的な変化は認められなかった。20年以上有機物を連用しても質的な変

化はないことから、腐植の変化はさらに長期の有機物連用が必要であると考えられる。

わら連用による土壌への有機物の蓄積について、高橋・千葉¹⁵⁾は稲わらおよび稲・麦わらを用いて灰色低地土で試験を行い、2年後で土壌の全炭素および全窒素が高く、その割合は、稲わらより稲・麦わら施用により著しかったことを報告している。一方、上村ら⁸⁾は、灰色低地土において、稲わら連用により、6年後の土壌の全炭素および全窒素は高く、わらの施用が多いほどその傾向が著しいことを報告している。本研究の初期では堆肥または稲・麦わら施用により、連用6年目までは土壌有機物量が、ほぼ直線的に増加した¹⁹⁾。この点に関し、志賀¹⁾は、各種有機物を連用した場合の炭素の集積率を予測している。これによると、施用する有機物の種類により集積程度は異なるが、連用5-10年までの炭素の集積はほぼ直線的であるが、その後の増加割合は低下するとしている。

したがって、二毛作水田において、堆肥施用と同程度の有機物を補給するには、最短でも10年の稲・麦わら施用が必要になってくると考えられるが、本研究の結果からは、土壌中炭素量はわら類を26年間施用しても堆肥区と同等にならなかった。これは二毛作水田の特徴と考えられるが、有機物の蓄積については土壌タイプ別にも検討が必要と考えられる。

3. 水稲、二条大麦の生育・収量に及ぼす影響

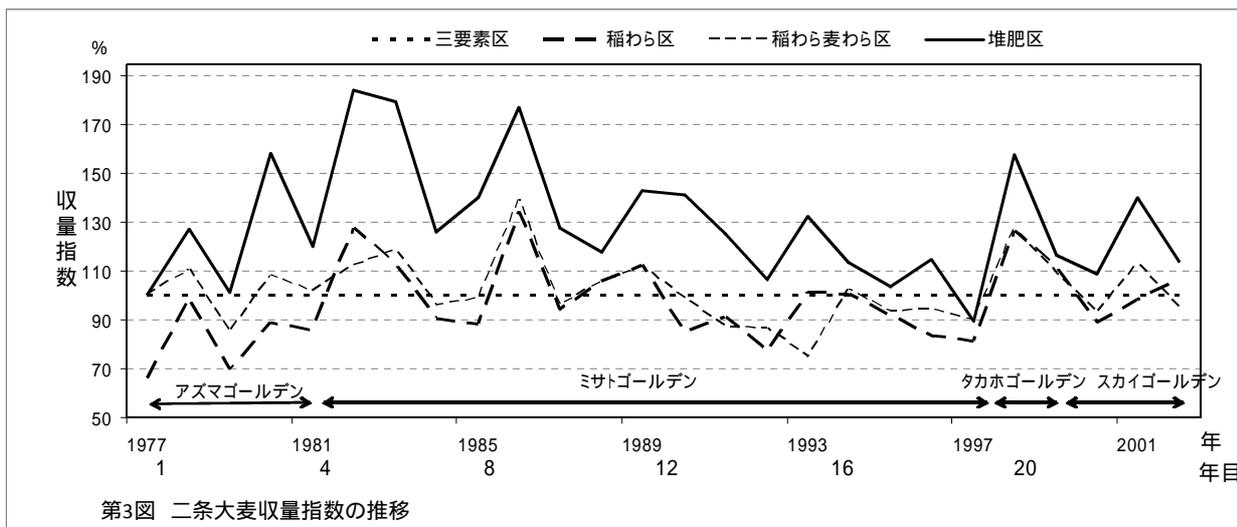
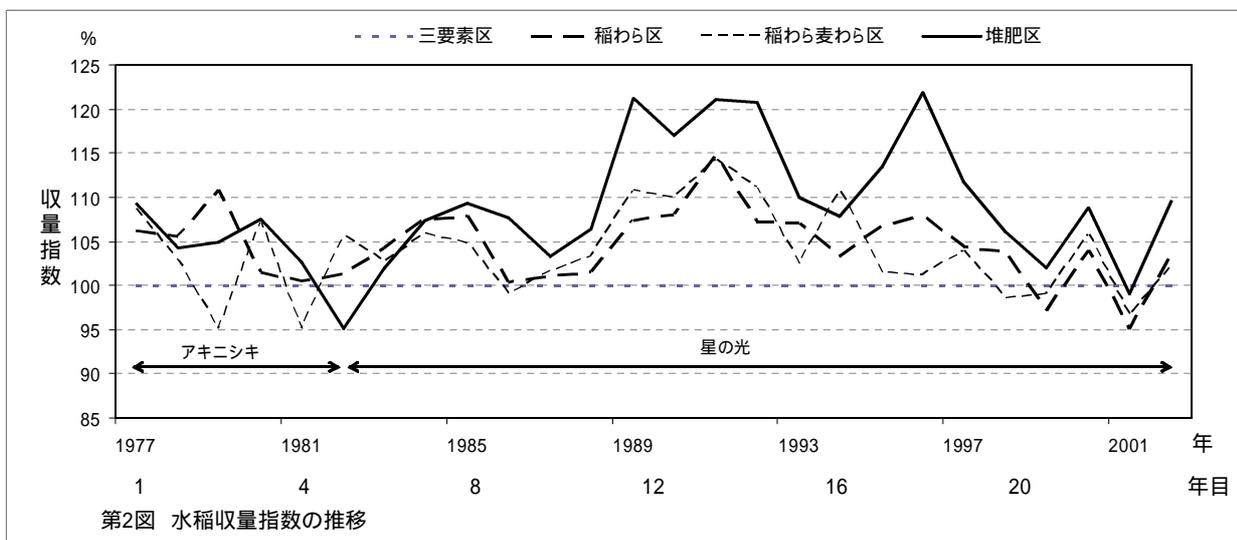
水稲26作目の草丈および茎数の推移を第6表に示した。草丈は、無窒素区を除けば出穂期までの差が小さかったが、成熟期には稈長・穂長とも稲わら区、稲わら麦わら区および

堆肥区が長くなった。茎数は、分けつ初期で堆肥区が525本/m²と他の区を大きく上回り、それ以降も他の処理区より茎数が多く、成熟期の穂数も多かった。分けつ初期の稲わら区及び稲わら麦わら区は、三要素区と同程度であった(茎数437, 428, 432本/m²)ものの、それ以後茎数が増加し、成熟期では三要素区より穂数が多かった。この生育量の差は、主に有機物の窒素発現量の違いが考えられる。一般に、堆肥は窒素放出型、稲わら、麦わらは窒素取込型といわれており、わら類のような窒素取込型は、土壌中の残留年数が長くなるにつれて窒素放出型へ変化していく。

したがって、本研究においても、堆肥区では窒素の放出

が初期生育から行われたため、水稻の生育が分けつ初期から旺盛であったと考えられる。一方、稲わら区、稲わら麦わら区は施用26年目でも水稻の初期生育に土壌窒素発現量をやや抑え、生育中～後期から生育旺盛になったと考えられる。

初年度から26年間の水稻の収量指数の年次経過を第2図に、二条大麦の収量指数の年次経過を第3図に、第7表に1997～2002年の収量および収量構成要素を示した。精玄米重が目標収量480kg/10a以上得られた回数は、無窒素区で0回、三要素区で14回、稲わら区で14回、稲わら麦わら区で12回、堆肥区で16回となった。



第6表 26作目水稲(2002年)の草丈および茎数の推移

処理区	分けつ初期		最高分けつ期		穂揃前		出穂期		成熟期		
	草丈 cm	茎数 本/m ²	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本/m ²						
無窒素区	39	354	56	393	68	334	88	302	62	18	282
三要素区	42	432	61	431	71	408	95	342	70	20	320
稲わら区	41	437	62	501	73	390	92	366	73	20	341
稲わら麦わら区	41	428	63	473	74	420	98	357	74	20	351
堆肥区	42	525	66	519	75	430	102	377	76	21	373

第7表 1998(22作目)から2002(26作目)年の収量及び収量構成要素 水稲、二条大麦 平均値

処理区	水 稲										
	精玄米重 kg/10a	指数 %	穂数 本/m ²	総籾数 ×100/m ²	一穂籾数 粒	登熟 歩合					
無窒素区	386	(35)	80	256	(26)	181	(12)	71	(4.3)	90	(3.6)
三要素区	484	(51)	100	319	(16)	239	(17)	76	(6.8)	86	(4.8)
稲わら区	486	(46)	100	338	(19)	250	(11)	74	(4.5)	83	(4.0)
稲わら麦わら区	484	(40)	100	337	(19)	254	(7)	74	(4.8)	82	(3.2)
堆肥区	507	(47)	105	364	(25)	277	(11)	78	(6.7)	79	(1.7)

処理区	二条大麦			
	子実重 kg/10a	指数 %	穂数 本/m ²	
無窒素区	125	(66)	33	252
三要素区	384	(55)	100	507
稲わら区	409	(76)	107	528
稲わら麦わら区	409	(53)	107	528
堆肥区	483	(49)	126	632

注 ()は標準偏差

同様に二条大麦の子実重が目標収量500kg/10a以上得られた回数は、無窒素区で0回、三要素区で1回、稲わら区で1回、稲わら麦わら区で1回、堆肥区で13回となった。いずれの作物でも堆肥区が高い収量性を示した。また、21~25作目の水稲の平均収量は、無窒素区386kg/10a、三要素区486kg/10a、稲わら区486kg/10a、稲わら麦わら区486kg/10aおよび堆肥区507kg/10aとなり、堆肥を連用することにより三要素区より21kg/10a増収した。わら類は20年目程度までは三要素区より増収している年もあるが、近年5年間は収量差がない。また、第2図、第3図より二条大麦収量が高い年は水稲収量が低い傾向が見られる。これは気象等の要因で畑作中に可給態窒素を消耗し、水稲の初期生育においてわら類へ窒素の取り込みが起き、初期生育の遅れを回復できないからと推察される。今後、暖冬や夏季の高温等の気象要因と有機物施用による土壌の変化について検討する必要がある。二条大麦の平均収量は、無窒素区125kg/10a、三要素区384kg/10a、稲わら区409kg/10a、稲わら麦わら区409kg/10aおよび堆肥区483kg/10aとなり、有機物を連用することにより三要素区より25~99kg/10a増収した。わら類施用で増収したのは、畑状態になり土壌窒素発現が増加したためと考

えられ、有機物を施用した区の収量は年次間で変動があるものの、三要素区の収量レベルに対して増収傾向がみられた。

本研究と同様に、堆肥や稲わらの施用により水稲が増収したとの報告がされている。堆肥施用は、水稲では初期生育から生育旺盛となり増収した。一方、稲わら施用は、連用当初では窒素飢餓による減収が認められたが、連用3年後からは水稲の生育が旺盛になり増収した¹⁶⁾。また、堆肥施用は生育中期以降に土壌窒素が多く発現し、もみ数を増加し、稲わら施用は生育中~後期に土壌窒素が多く発現し、もみ数の増加や登熟歩合が向上し、水稲は増収した⁹⁾。これらの報告は、いずれも水稲の生育がやや小さかった。しかし、篠田・安西¹⁴⁾の試験では、収量が高いこともあって有機物の施用効果は認められなかった。三要素区の平均収量が571kg/10aであり、有機物の施用により富化した窒素を稲が急激に吸収したため、もみ数および茎数が増加し、過繁茂な生育状態となった。このことにより、登熟不良を引き起こし、収量の増加が見込まれなかったのである。したがって、有機物を連用する上で、通常、生育量が中程度~やや小さい場合は、有機物施用による増収効果が期待されると考えられる。二条大麦に

についても同様であるが、本研究のように二毛作水田の場合は、水田状態で有機物分解を抑え畑状態で分解が促進されることを繰り返すため、有機物の増収効果が現れ始める連用年数が長くなるものと考えられる。

以上から、灰色低地土水田における有機物施用効果は初年度には不安定だが、連用により増収効果が発現するといえる。また、わら施用区、堆肥区は、連用7年目以降、三要素区の収量を上回り、連用により徐々に増収効果が発現することが示された。

4. 水稲および二条大麦の各成分吸収量の推移および品質調査

21～25作目の窒素含有率および窒素吸収量を生育時期別に第8表に示した。水稲生育期間中の窒素含有率は、三要素区と比較して無窒素区で低く、わら類区でやや高い傾向を示し、堆肥区では高く推移した。窒素吸収量は、分けつ初期に堆肥区が3.5kg/10aと高い値を示し、その後も最も高い値を示した。成熟期では堆肥区のわらが4.5kg/10a、もみが6.7kg/10aとなり、三要素区の吸収量(わら3.4kg/10a、もみ

0kg/10a)を上回った。これは、速効性の化学肥料を施肥した三要素区の窒素供給が生育前期に多くなるのに対し、堆肥区の水稲は、生育後半に多くの窒素を吸収したためと考えられる。

上野ら¹⁷⁾は、前期吸収量がやや少なく、穂肥期以降吸収量が増加する経過をとることが水稲を増収させる窒素の吸収パターンであると報告している。本研究では、堆肥区の窒素吸収が初期に高く、その後さらに生育中～後期にかけて高まった。この窒素吸収パターンが、三要素区や稲わら区、稲わら麦わら区よりも増収する要因になったと考えられる。関矢¹²⁾らによって施肥窒素と土壌窒素からの水稲による窒素吸収状況に関する研究が行われ、寒地での稲わら施用では施肥窒素の利用率が低くなり、むしろ土壌窒素の発現が多くなること、暖地では吉沢^{20,21)}、井手³⁾は土壌窒素は排水不良水田と早期栽培を除くと、緩効的窒素肥料のような働きをして後期の水稲生育が良好となり、窒素吸収量も多くなると報告している。

第8表 1998(22作目)年から2002年(26作目)のNの平均含有率及び吸収量

処理区	水 稲							
	含 有 率 %				%			
	分けつ期		追肥前	出穂期	成熟期		わら	もみ
初期	最高	わら			もみ			
無 窒 素 区	2.80 (0.49)	1.59 (0.16)	1.09 (0.12)	0.80 (0.05)	0.51 (0.05)	0.96 (0.08)		
三 要 素 区	3.03 (0.60)	1.65 (0.22)	1.15 (0.19)	1.07 (0.13)	0.63 (0.07)	1.08 (0.14)		
稲 わ ら 区	3.10 (0.60)	1.82 (0.32)	1.23 (0.20)	1.08 (0.13)	0.65 (0.06)	1.09 (0.10)		
稲わら麦わら区	2.98 (0.54)	1.85 (0.25)	1.24 (0.18)	1.13 (0.13)	0.67 (0.08)	1.09 (0.10)		
堆 肥 区	3.09 (0.50)	1.87 (0.26)	1.30 (0.20)	1.14 (0.16)	0.72 (0.07)	1.14 (0.09)		

処理区	水 稲							
	吸 収 量 kg/10a				kg/10a			
	分けつ期		追肥前	出穂期	成熟期		わら	もみ
初期	最高	わら			もみ			
無 窒 素 区	1.4 (0.30)	3.1 (0.56)	4.0 (0.38)	5.2 (0.78)	2.1 (0.09)	4.1 (0.33)	6.1 (0.37)	
三 要 素 区	2.6 (0.42)	5.1 (0.36)	5.9 (0.41)	8.8 (0.85)	3.4 (0.35)	6.0 (1.28)	9.4 (1.52)	
稲 わ ら 区	2.8 (0.59)	5.9 (1.00)	6.8 (0.66)	9.5 (0.87)	3.7 (0.26)	6.1 (1.09)	9.7 (1.31)	
稲わら麦わら区	2.4 (0.36)	5.8 (0.64)	6.6 (0.33)	10.0 (1.31)	3.7 (0.20)	6.1 (0.98)	9.8 (1.13)	
堆 肥 区	3.5 (0.34)	7.0 (0.34)	7.2 (2.27)	11.3 (1.16)	4.5 (0.42)	6.7 (1.11)	11.2 (1.38)	

処理区	二 条 大 麦					
	含 有 率 %			吸 収 量 kg/10a		
	わら	子 実	わら	子 実	合 計	
無 窒 素 区	0.4 (0.08)	1.7 (0.23)	0.4 (0.08)	2.4 (0.40)	2.8 (0.47)	
三 要 素 区	0.4 (0.10)	1.7 (0.32)	1.3 (0.40)	6.5 (0.85)	7.8 (1.21)	
稲 わ ら 区	0.4 (0.10)	1.7 (0.20)	1.3 (0.44)	7.0 (1.50)	8.3 (1.88)	
稲わら麦わら区	0.3 (0.04)	1.6 (0.11)	1.2 (0.25)	6.5 (0.97)	7.8 (1.18)	
堆 肥 区	0.4 (0.08)	1.7 (0.21)	1.7 (0.43)	8.4 (1.51)	10.1 (1.85)	

注 ()は標準偏差

第9表 1998年(22作目)から2002年(26作目)の P_2O_5 の平均含有率及び吸収量

処理区	水 稲			
	含有率 %		吸収量 kg/10a	
	わら	もみ	わら	もみ
無 窒 素 区	0.3 (0.02)	0.7 (0.07)	1.1 (0.12)	3.0 (0.36)
三 要 素 区	0.3 (0.01)	0.7 (0.07)	1.5 (0.08)	3.9 (0.38)
稲 わら 区	0.3 (0.02)	0.7 (0.07)	1.6 (0.11)	3.8 (0.35)
稲わら麦わら区	0.3 (0.02)	0.7 (0.05)	1.6 (0.11)	3.8 (0.28)
堆 肥 区	0.3 (0.02)	0.7 (0.05)	1.9 (0.14)	4.1 (0.36)

処理区	二条大麦			
	含有率 %		吸収量 kg/10a	
	わら	子実	わら	子実
無 窒 素 区	0.3 (0.04)	1.0 (0.05)	0.4 (0.07)	1.4 (0.18)
三 要 素 区	0.1 (0.01)	0.9 (0.01)	0.5 (0.07)	3.4 (0.22)
稲 わら 区	0.1 (0.01)	0.8 (0.04)	0.5 (0.08)	3.4 (0.33)
稲わら麦わら区	0.1 (0.01)	0.9 (0.03)	0.5 (0.08)	3.5 (0.27)
堆 肥 区	0.1 (0.02)	0.9 (0.02)	0.7 (0.08)	4.3 (0.17)

注 ()は標準偏差

二条大麦の成熟期の窒素含有率は、処理区間差がなかった。二条大麦をビール醸造用として用いる場合の子実のタンパク質含有率は、10～11%のものが求められる。タンパク質中の窒素含有率が約16%であることから、子実の窒素含有率×6.25で粗タンパク質を試算するとすべての区で約10%であり、タンパク質含有率の増減は判然としなかった。窒素吸収量は、三要素区と比較するとわら類が同等で、堆肥区で多かった。これは、稲わらは無機態窒素が少なく、麦の生育は易分解性有機物に依存するが、堆肥は稲わらと比較して無機態窒素が多く、さらに易分解性窒素も存在するからと考えられた。21から25作目の成熟期の P_2O_5 吸収量を第9表に示した。本谷²⁾は、分けつ期の水稻の P_2O_5 を0.22%以上にすることにより分けつを促進、旺盛になるとしており、また、中野³⁾は、 P_2O_5 が0.26%以下で分けつが劣ると報告している。一般に栄養成分の含有率は生育に伴って低下することから、本研究の成熟期の P_2O_5 含有率が0.3%であり、分けつに対する P_2O_5 欠乏の影響はなかったものと考えられる。

二条大麦の成熟期の P_2O_5 含有率は、処理区間差がなく、 P_2O_5 吸収量は三要素区に較べてわら類が同等で、堆肥区で多かった。これは、窒素と同様に無機態 P_2O_5 と易分解性有機物の量の違いによる考えられた。

成熟期における窒素吸収量の年次間推移を第10表に示

した。施用初年度は、水稻および二条大麦とも稲わら区および堆肥区と三要素区との差が小さく、有機物の施用効果が明瞭ではなかった。しかし、堆肥区の窒素吸収量は、連用2年目以降継続的に三要素区より高い傾向であった。これらのことから、有機物の連用が窒素吸収量を高める効果は、堆肥では連用2年目から施用効果が高くなることが示され、この傾向は、収量の推移と同様であった。稲わら区、稲わら麦わら区における水稻の窒素吸収量は、三要素区に比較して高く、二条大麦の窒素吸収量はほぼ同等であった。これは、畑状態でのわら類の分解に関係していると考えられる。

成熟期における P_2O_5 、 K_2O 、 CaO および MgO の吸収量を第11～14表に示した。 P_2O_5 は初年度に水稻、二条大麦とも三要素区と比較して堆肥区で多く、わら類区は明瞭な差が認められなかった。この傾向は26作目も同様であった。 K_2O は水稻、二条大麦とも三要素区と比較して稲わら麦わら区及び堆肥区で施用当初から吸収量が若干高まる傾向を示し、26作目は堆肥区で最も吸収量が多かった。 CaO 、 MgO は年による変動はあるものの、水稻、二条大麦とも三要素区と比較して吸収量に差がない傾向を示した。一般に CaO 、 MgO は土壌中に多量に存在しても吸収に差が出にくいとされており、本研究でも堆肥施用による増加はなかった。

第10表 成熟期のN吸収量

		水 稻				二 条 大 麦			
処理区		2作目	11作目	21作目	26作目	2作目	11作目	21作目	26作目
		1978	1987	1997	2002	1978	1987	1997	2002
無	窒素区	4.9	5.7	5.4	5.9	1.8	2.3	3.1	3.5
三	要素区	11.2	11.2	10.9	8.4	4.8	7.4	9.5	7.3
稻	わら区	11.7	12.0	12.1	9.5	5.2	6.6	7.1	9.0
稻	わら麦わら区	11.4	12.2	11.7	9.8	6.2	6.6	7.5	7.9
堆	肥区	12.3	13.4	14.2	11.5	6.6	9.2	8.6	10.0

第11表 成熟期のP₂O₅吸収量

		水 稻				二 条 大 麦			
処理区		2作目	11作目	21作目	26作目	2作目	11作目	21作目	26作目
		1978	1987	1997	2002	1978	1987	1997	2002
無	窒素区	2.2	2.8	3.6	4.2	0.5	2.7	2.4	2.7
三	要素区	3.8	4.3	5.5	5.7	1.4	5.1	4.8	4.2
稻	わら区	4.4	4.9	5.8	5.6	1.8	5.7	3.6	3.4
稻	わら麦わら区	4.0	4.6	5.5	5.7	2.0	5.8	4.5	4.0
堆	肥区	4.4	4.5	6.0	6.3	2.2	8.0	3.9	4.7

第12表 成熟期のK₂O吸収量

		水 稻				二 条 大 麦			
処理区		2作目	11作目	21作目	26作目	2作目	11作目	21作目	26作目
		1978	1987	1997	2002	1978	1987	1997	2002
無	窒素区	5.5	7.5	8.5	10.4	3.1	2.5	5.6	4.7
三	要素区	11.1	13.2	14.4	13.7	9.3	8.0	11.2	9.1
稻	わら区	11.6	14.6	16.2	14.8	8.6	9.3	12.5	9.8
稻	わら麦わら区	14.1	15.7	15.6	14.8	11.7	9.6	16.3	9.5
堆	肥区	18.4	16.1	18.8	19.0	13.9	13.3	17.4	14.3

第13表 成熟期のCaO吸収量

		水 稻				二 条 大 麦			
処理区		2作目	11作目	21作目	26作目	2作目	11作目	21作目	26作目
		1978	1987	1997	2002	1978	1987	1997	2002
無	窒素区	1.0	1.0	2.3	1.7	0.5	0.4	0.9	0.9
三	要素区	2.5	1.4	4.0	2.2	1.4	1.6	3.2	1.7
稻	わら区	2.3	1.6	3.9	2.3	1.3	1.2	2.6	1.8
稻	わら麦わら区	2.6	1.6	4.0	2.3	1.4	1.2	3.5	1.6
堆	肥区	3.0	1.5	4.4	2.3	1.6	1.5	3.6	2.3

第14表 成熟期のMgO吸収量

		水 稻				二 条 大 麦			
処理区		2作目	11作目	21作目	26作目	2作目	11作目	21作目	26作目
		1978	1987	1997	2002	1978	1987	1997	2002
無	窒素区	2.0	1.3	1.0	1.6	0.4	0.4	0.7	0.9
三	要素区	4.2	1.9	1.7	1.9	0.9	1.1	1.1	1.6
稻	わら区	4.3	2.0	1.7	2.0	1.0	1.0	0.9	1.6
稻	わら麦わら区	4.5	1.9	1.6	1.9	1.0	1.0	1.0	1.5
堆	肥区	4.9	2.0	2.0	2.3	1.2	1.2	0.8	1.7

第15表 26年間の総成分吸収量(水稻+二条大麦)

処理区	kg/10a				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
無窒素区	197	139	293	47	51
三要素区	427	238	563	93	90
稲わら区	447	249	627	91	91
稲わら麦わら区	446	249	659	90	92
堆肥区	544	292	782	112	109

第16表 26年間の資材からの総成分投入量

処理区	kg/10a				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
稲わら区	112	34	306	45	25
稲わら麦わら区	143	48	530	77	40
堆肥区	572	1,118	858	1,170	728

第17表 玄米品質及び窒素濃度 (26作目 2002年)

試験区	外観品質						窒素濃度 %
	品質	等級	粒張	光沢	乳白	腹白	
無窒素区	下上	3上	中	中	微	微	1.06
三要素区	下中	3中	中	中	微	微	1.17
稲わら区	下中	3中	中	中	微	微	1.25
稲わら麦わら区	下中	3中	中	中	微	少	1.31
堆肥区	下中	3下	中	やや否	微	少	1.30

注1. 外観品質は東京食糧事務所宇都宮事務所調べ

2. 品質:上上~下下の9段階 等級:1上~3下の9段階 粒張:大~小の5段階
光沢:良~否の5段階 腹白,乳白:無~多の6段階

わら類や堆肥に由来する各成分の総吸収量,総投入量を第15,16表に示した。堆肥区でCaO, MgOを除く各成分の吸収量が最も多かった。これは,堆肥の施用によって各成分の投入量が増加したことによると考えられる。

第4図に窒素の見かけの収支を示した。灌がい水の水质を測定していないので有機物と肥料からの投入量のみとし,施肥窒素未利用部分をすべて溶脱と見なして試算した。小山⁷⁾は,水稻吸収窒素に占める土壌窒素の依存度は,平均して68%であると報告しており,本研究では二毛作における窒素吸収となることから三要素区の施肥窒素利用率が約80%と高まったと考えられる。長期間にわたり有機物無施用で水稻および二条大麦を栽培すると見かけ上の窒素の収支は負になる。有機物を施用することにより,収支が正もしくは無施用に比べて負の値が小さくなることが示された。三要素区と比較して有機物施用区の見かけ上の窒素の収支が大きくなることは,土壌に有機物由来の窒素を富化させていることを示す上で重要と考えられる。

5. 玄米品質

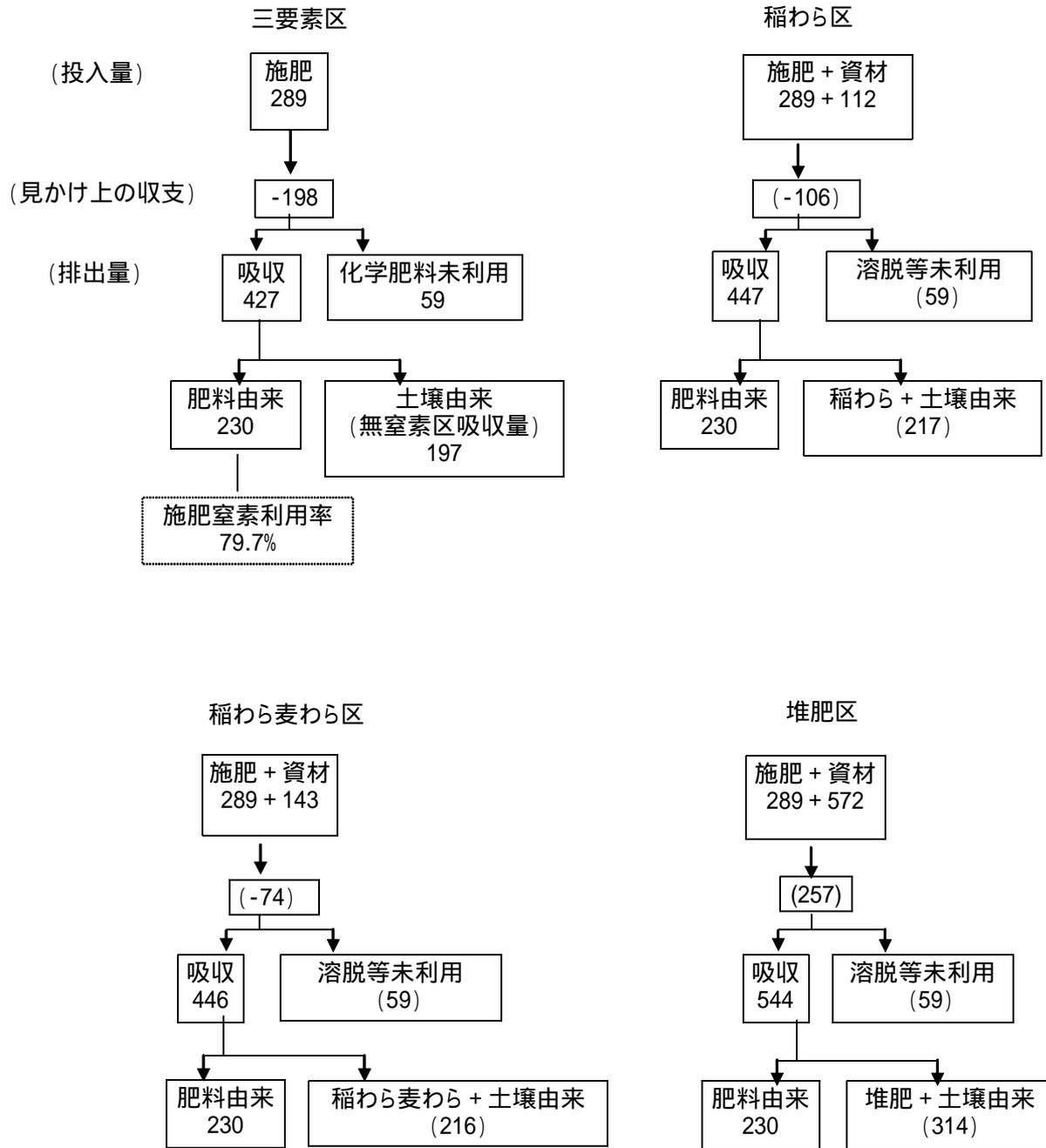
25作目の玄米品質調査を第17表に示した。玄米の窒素含有率を三要素区と比較すると,稲わら区,稲わら麦わら区および堆肥区の順で高まり,無窒素区は低かった。外観品質は,三要素区と堆肥区が同程度,無窒素区よりやや劣る品質項目もあった。有機物施用により窒素吸収量は多く総もみ数は多く,登熟歩合は低下したことから外観品質が低下した原因の一つと考えられる。また,生育後期の土壌窒素の発現が玄米中窒素含有率を増加させたと考えられる。このことから,有機物を連用し可給態窒素が増加した場合,外観品質を低下させず,玄米窒素含有率を増加させないために基

肥や追肥の減肥が必要と考えられる。

以上のように二毛作水田における有機物施用(稲わら,麦わら,稲わら麦わら堆肥)は,土壌物理性の改善,肥料成分による土壌の化学性の向上に効果がみられたが,20年以上の連用によってもわら類は堆肥施用と同等の効果を得られなかった。有機物施用により土壌中炭素は蓄積するが化学的な変化は認められなかった。有機物施用で可給態窒素は増加し,その形態はわら類施用と堆肥施用では異なることが示された。生育収量は年次変動があるもののわら類の施用で増加傾向を示し,堆肥施用で顕著な増加傾向を示した。今後,畑作期間中の気象要因と可給態窒素の消耗について検討する必要がある。わら類は試験期間中の総成分吸収量は窒素とK₂Oが多く,堆肥区はさらに顕著であった。有機物を連用し可給態窒素が増加した場合,生育後期の土壌窒素の発現が玄米中窒素含有率を増加させると考えられた。連年施用した有機物による土壌の物理化学性の変化は,施用をやめることにより速やかに消失すると推察され,施用を継続することが望ましい。今後,有機物の種類や長期連用による効果の発現,増加した可給態窒素や交換性塩基類に対応する減肥技術を確立する必要がある。

謝辞

本報告実施に当たり,鈴木美代子氏,高崎恭子主任技術員,福田正孝主任技術員および大貫悟主任技術員には試験ほ場の管理並びに調査等の補助に協力いただいた。ここに記して謝意を表する。



注: () は施肥窒素利用率を三要素区と同じとした場合の推定値 単位はNkg/10a

第4図 各処理区における26年間の見かけ上の窒素収支

引用文献

1. 平野繁・田辺猛(1996)堆肥施用による水稻収量の増加要因の解析. 土壌の物理性 73:31-35.
2. 本谷耕一(1961)東北における火山灰水田の稲作改良における土壌肥料科学的研究. 東北農試研報 21:1-14
- 3.

3. 井手一浩(1968)稲わらの肥効並びに地力に及ぼす影響(第3報 - 第6報), 佐賀農試研報, 8:99-124.
4. HONNA, T., YAMAMOTO, S., MATSUI, K. (1988) A simple procedure to determine melanin index that is useful for differentiating melanin from fulvic Andisols. *Pedologist*, 32:69-78.

5. 甲斐秀昭・橋本秀教(1976)土壌腐植と有機物, 農文協:136-176.
6. 神谷径明・大谷達明・島田昭史・水本順敏・堀兼明(1994)中粗粒灰色低地土水田における有機物及び珪カルの連用が土壌および水稲に与える影響. 静岡農試研報 38:1-10.
7. 小山雄生(1975)土肥誌46 260-269.
8. 中野政行・橋本俊一・土山豊(1970)開田地の生産力増強に関する研究 燐酸施肥量とその持続性. 栃木農試研報 24:19-31.
9. 野地良久・藤谷信二(1993)有機物の長期連用が土壌の理化学性と水稲の生育に及ぼす影響. 大分県農技センター研報 23:1-2.
10. 農林水産省農産課(1979)土壌環境基礎調査における土壌, 水質及び作物体分析法
11. 佐藤紀男・川島 寛・菅野義忠(1983)土壌中における有機物と土壌改良資材の施肥効果に関する研究. 福島農試研報 22:43-54.
12. 関矢信一郎・本谷耕一(1968)窒素供給系に及ぼす添加有機物の影響 東北農試研報 36:1-26
13. 志賀一一(1983)農耕地における各種有機物資材の利活用に関する研究会資料(関東東海地区)
14. 篠田正彦・安西徹郎(1998)グライ土水田の水稲に対する有機物の連用効果 第4報. 千葉農試研報39:59-69.
15. 高橋和夫, 千葉智(1979)農業技術 34:447-450
16. 上野正夫・斉藤昭四郎・小西力・斉藤正志・渡辺和夫・鈴木正(1978)水稲に対する有機物および土壌改良資材の施用効果. 山形県農試研報 12:57-86.
17. 上野正夫・安藤豊・藤井弘志・佐藤俊夫(1988)水稲の理想的な窒素吸収パターンと土壌窒素無機化量の関係. 土肥誌 59:316-319.
18. 山田良三・塩田悠賀里・今泉諒俊(1985)堆肥連用土壌におけるセルラーゼ活性及びプロティナーゼ活性について. 愛知農総試研報17:126-132
19. 吉沢崇, 中山喜一(1983)稲・麦わら施用水田の土壌肥料的研究(第5報), 栃木農試研報, 29, 49-60
20. 吉沢孝之(1971)水田における稲, 麦わら施肥とその効果, 農業技術26:407-413.
21. 吉沢孝之(1971)水田における稲, 麦わら施肥とその効果, 農業技術26:456-461.
22. 財団法人日本土壌協会(2000)堆肥等有機物分析法

