

水田におけるわら施用が排水水質および 土壌微生物に及ぼす影響

—とくに稲わら施用による水稻非作付期の硝酸塩流出軽減について—

柴原藤善・河村政彦*・小林正幸**

Influences of Straw Incorporation in Rotational Paddy Fields
on the Generated Load of Eutrophic Materials
and Soil Microorganism

The Effect of Rice Straw Incorporation in Fallow
Paddy Fields on the Reduction in the Discharge
of Nitrate Nitrogen

Fujiyoshi SHIBAHARA, Masahiko KAWAMURA
and Masayuki KOBAYASHI

水田における作物残渣の施用法が肥料成分の流出に及ぼす影響をライシメータで4年間調査した。とくに、水稻非作付期の稲わら鋤込みによる硝酸態窒素の流出軽減効果を検討するとともに、土壌微生物との関連性を考察した。

1) 窒素の流出量(用水負荷差し引き排出量)は、水稻非作付期15~195、水稻作-13~37、小麦作151~246、大豆作5~27g/ha/日の範囲にあり、栽培作物、耕起および作物残渣の処理による変動が大きかった。

一方、リン、CODの流出量は、水稻作付期に増加したが、Kについては変動が少なく、いずれも処理による差は小さかった。全期間の肥料の流出率は、窒素20~41%、リン7~10%、カリウム72~104%であった。

2) 水稻非作付期の窒素流出量は、硝酸態窒素が75~92%を占め、耕起によって増加したが、秋期の稲わら鋤込みにより、3か年平均で35%の流出が軽減された。しかし、焼却後の鋤込みは、流出軽減効果を22%に低下させた。

3) 秋期の稲わら鋤込みは、糸状菌、放線菌、好気性細菌の菌数を増加させたが、硝酸化成菌、脱窒菌、好気性セルロース分解細菌への影響は少なかった。また、作物残渣の連用により、土壌微生物バイオマスおよびアンモニア化成量が増加し、硝酸態窒素の流出軽減効果は、主に窒素の有機化促進によると考えられた。

4) 水稻非作付期の耕起処理は、冬から春の雑草の生育を抑制し、水稻の生育を安定化させた。また、稲わら鋤込みは、収量を経年的に向上させ、増収効果も高かった。

5) 以上の結果から、水稻非作付期の稲わら鋤込みは、窒素の有機化を促進させ、土壌窒素肥沃度、作物の生産安定および硝酸態窒素の流出軽減に寄与すると考えられた。

* 現在 湖北地区農業改良普及所、** 現在 滋賀県農業共済組合連合会
本報告の一部は、1991年4月日本土壌肥料学会大会(名古屋市)で発表した。

1. 緒 言

閉鎖性水域における富栄養化の原因として、農耕地など面源からの肥料成分の流出も問題となっていることから、本県では耕地面積の90%以上を占める水田を中心に発生負荷量調査と流出軽減に関する試験研究を進め、水稻の生産安定と水質保全に寄与する施肥・水管理法を確立してきた^{23, 3, 18)}。

一方、水稻非作付期には、耕起によって土壌有機態窒素の無機化、硝酸化成が促進され、透水性の大きい水田では浸透排出が増大した事例²⁷⁾や、谷津田では畑・樹園地から流入する硝酸態窒素の脱窒能が高いことを評価した事例²⁶⁾もあり、地形的条件、排水条件および土壌管理法によって硝酸態窒素の流出機構や浄化機能にかなりの変化が生じるものと考えられる^{1, 10, 15, 16)}。

現在、水田に施用される有機物は、コンバインの普及により、稲わらが主体となっており、非作付期には稲わらおよび土づくり肥料の施用、深耕・畦立てなどが一般的な地力培養として行われている^{14, 22)}。しかしながら、非作付期水田の発生源対策として、土壌の窒素肥沃度の維持・増強を図りながら、窒素の流出を軽減させる土壌管理法について検討した事例は見あたらない。また、近年では米の生産調整によって水田の畑利用が増加しており、本県でも小麦・大豆を基幹とした田畑輪換栽培が定着していることから、これら畑作物をも含めた水質汚濁成分流出軽減技術を確立することが重要な課題となっている。

硝酸態窒素の流出軽減には、畑作物の吸収特性に応じた窒素施肥がまず重要であるが、非作付期には土壌窒素の形態変化に関与する多くの従属栄養微生物の有機化、脱窒作用を利用することも有効である。既報¹⁹⁾では施設土壌に集積した硝酸態窒素を湛水除塩前に予め除去する方法として、夏期の稲わら施用による脱窒促進効果を報告した。しかしながら、非作付期の水田土壌では、耕起、畦立てなどによって有機態窒素の無機化・硝酸化成が促進され、降雨時に硝酸態窒素が溶脱され易くなる。したがって、稲わら施用によって有機化を促進させれば、土壌の窒素肥沃度の維持・増強や作物の安定増収など多面的な効果が期待できると考えられる。

このような観点から、筆者らは、水田土壌中での土壌微生物と窒素動態との関係を解析し、効率的な有機

物施用法の確立を目指した一連の試験を実施している。本報では、ライシメータを用いて、4年5作体系（水稻－水稻－水稻－小麦・大豆）の田畑輪換栽培における水質汚濁成分の排出負荷量を調査するとともに、特に、耕起および稲わら処理が水稻非作付期の硝酸態窒素の流出に及ぼす影響を検討した。

2. 材料および方法

2.1 試験方法

1985年11月から1989年10月までの4年間、滋賀県農業試験場内のライシメータを用いて実験を行った。ライシメータの構造は、面積が6㎡（2m×3m）、深さが1mのコンクリート製で、地表から約30cmまでは滋賀農試431号田（細粒グライ土）の作土が、またそれより下層には花崗岩の風化した黄褐色砂壤土がそれぞれ充填されている²⁾。なお、実験を始める前年には各層の作土を混合し、均一にした後、水稻を同一の肥培管理のもとで栽培した。

試験区は表1-1のとおり、5区設け、いずれも単連制とした。処理内容は、作物残渣（稲わら、麦わら）の施用および耕起・畦立ての有無を組合せるとともに、作物残渣の焼却処理も加えた。耕起区では、作物残渣の散布後あるいはそれを焼却した後に、15cmの深さで耕耘して鋤込み、畦立てを行った。また、不耕起区では、作物残渣を散布あるいは散布後焼却した状態のまま5月まで放置した。ただし、小麦、大豆作の場合には、不耕起区についても、わら処理後に耕耘し、播種した。栽培作物は、水稻（3作）、小麦、大豆で、それぞれの施肥量を表1-2に示す。また、供試土壌の化学性は表1-3のとおりである。

表1-1 試験区の概要

区番	試験区名	作物残渣処理		耕起
		施用	焼却	
1	不耕起・わら施用	+	-	-
2	不耕起・わら焼却	+	+	-
3	耕起・わら焼却	+	+	+
4	耕起・わら施用	+	-	+
5	耕起・わら無施用	-	-	+

注：

- 1) 処理時期：11月上旬、+：処理、-：無処理。
- 2) 不耕起処理は、水稻非作付期についてのみ実施。
- 3) 残渣施用量は、稲わら700、麦わら400g/㎡。
- 4) 残渣焼却後の乾物重は、稲わらが1年目180、2年目130、3年目180、4年目300、麦わらが125g/㎡。

表1-2 栽培作物および施肥量

年次	作物(品種)	施肥量 (g/m ²)		
		N	P	K
1986 ~1988	水稻(日本晴)	10.0	2.6	9.1
1989	小麦(農林61号)	10.0	2.6	8.5
	大豆(エンレイ)	2.0	2.6	5.0

注1) 水稻のN施肥配分: 基肥3.0、追肥3.0、穂肥4.0。

2) 小麦のN施肥配分: 基肥5.0、追肥2.0、追肥3.0。

表1-4 施用作物残渣の性質(含有率%)

	C	N	P	K	C/N
稲わら	37.3	0.57	0.10	1.47	65.4
麦わら	39.2	0.23	0.05	0.82	170.4

注: 1) 供試収穫物残渣は、全区の残渣を等量混合したもの。

2) 稲わらは、4か年の平均値。

表1-3 供試土壌の化学性

層位 (cm)	T-C	T-N %	T-P	置換性塩基			CEC	Truog- P ₂ O ₅ mg/100g
				Ca	Mg	K		
				me/100g				
I (0~12.5)	2.4	0.19	0.12	14.3	2.2	0.5	13.4	25.0
II (12.5~25.0)	1.6	0.12	0.10	11.8	2.0	0.4	11.1	19.2

水質汚濁成分である窒素(N)、リン(P)、化学的酸素要求量(COD)、カリウム(K)の流出量は、次のように調査した。まず、水稻作付期には、落水および降雨による地表排水を200L容のポリエチレン樹脂製のタンクで採水した。また、地下浸透水は、毎週2回(日当たり2.9mm)、深さ30cmの集水パイプから60Lずつ採水した。さらに、水稻の非作付期および小麦・大豆作付期には、降雨後の地下浸透水を最下端(約80cm深)のパイプから200L容のタンクに採水し、それぞれ分析に供した。なお、試験期間中に浸透排水を採水した回数は、水稻非作付期45(3か年)、水稻作付期37(2か年)、小麦作26、大豆作15回であった。

かんがい用水は、滋賀農試内の水道水を使用し、各槽の蛇口に取り付けた水量メータにより、用水量を測定した。また、降水量は滋賀農試内での気象観測値を用い、それぞれ適時採水し、分析に供した。

つぎに、作物残渣の施用および耕起が、土壌の微生物性とアンモニア化成量に及ぼす影響を把握するため、水稻2作後の非作付期において作土層を経時的に採取し、分析に供した。耕起区においては、作物残渣の連用による有機化の促進効果を微生物バイオマスからも評価するため、本試験をさらに1年継続し、小麦、大豆を栽培した跡地土壌を採取、分析した。

2.2 分析方法

水質: 分析項目は、全窒素(T-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、全リン(T-P)、CODおよびKで、工場排水試験方法JIS010に準拠したが、T-Nを微量窒素分析装置(Yanako TN-7)、NO₃-Nをフェノール硫酸法およびサリチル酸法、T-Pを加圧分解法(環境庁告示140、1983)により、それぞれ定量した。

土壌・作物体: 常法に従った。なお、アンモニア態窒素(NH₄-N)はインドフェノール法により定量した。

微生物数: 既報¹⁹⁾の方法に準じて、糸状菌、放線菌、好気性細菌、アンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌および好気性セルロース分解細菌を計数した。また、Giltay培地を用いて、NO₃⁻を消失したものを硝酸還元菌、さらにDurham管中に気泡のたまったものを脱窒菌としてそれぞれ計数した。

微生物バイオマス: 微生物由来の有機態炭素(E_c)、全窒素(E_N)およびニンヒドリン発色窒素(E_{NIN})はクロロホルム燻蒸・抽出法により、またアデノシン3リン酸(ATP)はトリクロロ酢酸・リン酸混液で抽出し、それぞれ定量した²⁴⁾。なお、有機態炭素は、全有機態炭素計(Shimazu TOC-5000)により自動分析した。

2.3 水質汚濁成分の差し引き排出量の算出法

稲作期間中の用水量は、試験区による変動が5%以内に収まったことから、用水量および地表排水量はいずれの区も同一として取り扱った。また、1年目の水稻作付期には、排水水質の調査を行わなかったため、用水量および地表排水量を2年目と3年目の水稻作付期の値の平均値とした。なお、地表排水量は、滋賀農試内で観測した計器蒸発散量に係数（水稻生育ステージごとの蒸発散比⁵⁾）を乗じて蒸発散量を求め、それをもとに算出した。

用水の流入負荷量は、稲作期間中の平均水質に用水量を乗じて算出した。また、各時期の浸透排水および地表排水の水質に、その時期の排水量を乗じて流出負荷量を算出し、これらから流入負荷量を差し引いたものを差し引き排出量とした。

表2 水収支 (mm)

期 間	区 番	非作付 ¹	水稻 ¹	非作付 ²	水稻 ²	非作付 ³	水稻 ³	小麦 ⁴	大豆 ⁴	全 期 間	
										合 計	流出率(%)
降 水		580	806	532	859	484	1109	1104	762	6236	
用 水		-	636	-	721	-	550	-	237	2144	
地表排水		-	399	-	253	-	545	-	-	1197	
浸透排水	1	520	515	466	529	374	500	763	647	4314	65.8
	2	489	515	445	529	336	500	768	682	4264	65.2
	3	430	515	420	529	305	500	762	695	4156	63.9
	4	419	515	414	529	316	500	807	713	4210	64.5
	5	429	515	421	529	304	500	745	672	4115	63.4
流出率 (%) 平均		78.9	63.4	81.4	49.5	67.6	63.0	69.6	68.2	64.5	

注：1) 流入＝降水＋用水、流出＝地表排水＋浸透排水、流出率＝流出／流入。

2) 1年目の水稻作期の用水量および地表排水量は、2作目と3作目の平均値とした。

3) 作付期の肩数字は、試験開始後の年次を示し、各期間の日数は次のとおり。

非作付期：186日、水稻作期：179日、小麦作期：238日、大豆作期：131日。

3.2 用排水水質

降水および用水の平均水質を表3に示す。降水については、採水した17回の降水量で加重平均した。用水に使用した水道水水質は、T-Nが農業用水水質基準の1mg/Lを超えているものの、NO₃-Nの割合が高かった。浸透排水の水質を図1-1～6に示す。まず、Nについては、NO₃-Nが畑状態下で高くなり、T-Nに

3. 結果および考察

3.1 水 収 支

試験期間中の水収支を表2に示す。降水量に対する浸透排水量の割合（降雨流出率）は、全区平均で、水稻非作付期（3か年平均）76%、小麦作70%であった。大豆作については、夏期の過干時にかんがいを行ったため、流入水量に対する浸透排水量の割合が68%となった。なお、水稻非作付期の耕起処理による影響をみると、3か年平均の降雨流出率は耕起区72%、不耕起区80～85%であった。

水稻作付期には、降水、用水による流入量が1620mm（2作目と3作目の平均）、浸透排水が515mm、地表排水が399mmで、流出率は56%であった。全期間の流出率は、全区平均で65%となった。

表3 降水および用水の平均水質 (mg/L)

区 分(採水回数)	COD	T-N	NO ₃ -N	T-P	K
降水 (n=17)	1.35	0.57	0.24	0.016	0.09
用水 (n=5)	0.93	1.27	1.22	0.007	1.15

占める割合も高かった。ピーク時の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、水稲非作付期が3月に $2.6\sim 12.4\text{mg/L}$ 、小麦作が1～2月に $15.0\sim 23.7\text{mg/L}$ 、大豆作 $1.3\sim 3.6\text{mg/L}$ を示した。水稲非作付期における耕起およびわら処理の影響は、耕起>不耕起、わら無施用>焼却>施用となり、耕起・わら無施用区では $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が水道水基準値の 10mg/L を上回ることがあった。また、小麦作には、全区とも耕起、基肥施用(6gN/m^2)によって濃度が高くなり、ピーク時には水道水基準を大きく上回った。耕起処理区では、水稲非作付期と同様にわら無施用区が最高となったが、わら施用では低下した。これに対して、水稲作付期には5月の湛水直後が $0.3\sim 1.9\text{mg/L}$ であったが、6月以降は 0.1mg/L 未満となった。

つぎに、COD、T-Pについては、水稲作付期に濃度が上昇し、6～7月にいずれもCOD $22.6\sim 30.9\text{mg/L}$ 、T-P $1.04\sim 1.34\text{mg/L}$ の範囲でピークを示し、わら施用区でやや高くなった。しかし、水稲非作付期、小麦・大豆作付期には、いずれもCOD 6mg/L 、T-P 0.10mg/L 以下であった。

Kについては、作付および処理による明らかな差は認められず、約 $5\sim 15\text{mg/L}$ の範囲で変動し、実験当初がやや高い傾向にあった。

水稲作付期の地表排水については、基肥施用3日後の田植え前落水、追肥施用後の降雨による溢流時に、T-N、T-Pが高くなったが、処理による差があまり認められず、加重平均水質は表4のとおりとなった。

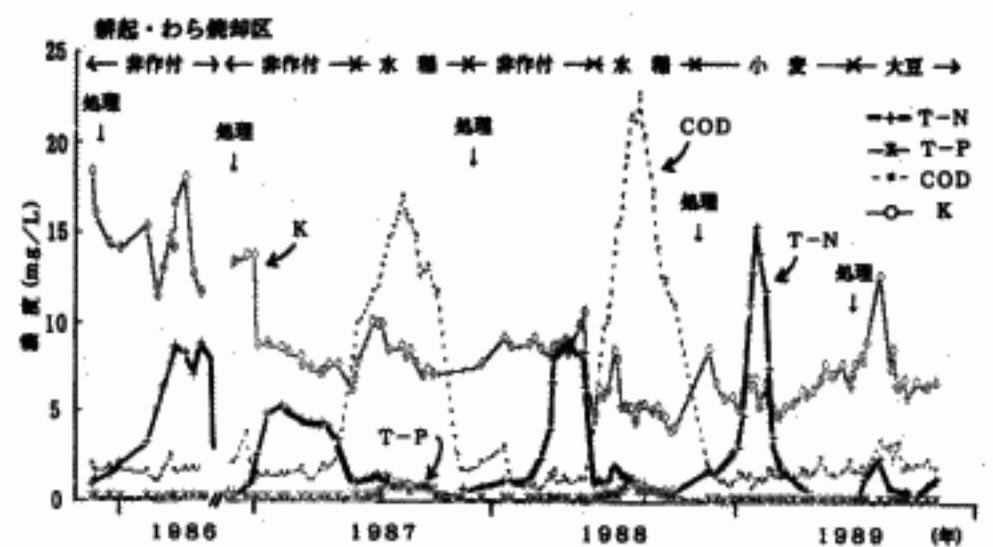


図1-3 期間中の浸透排水水質の推移(区番3)

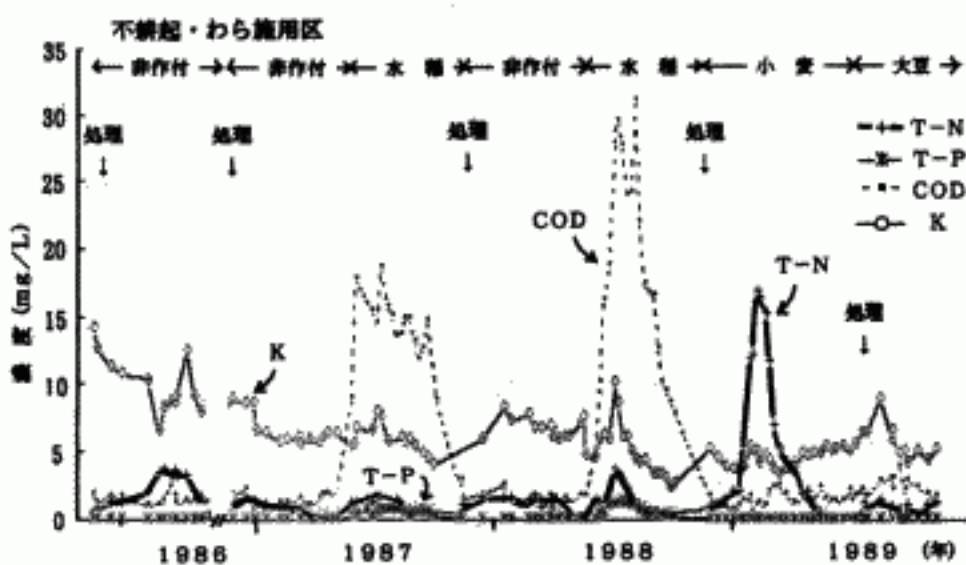


図1-1 期間中の浸透排水水質の推移(区番1)

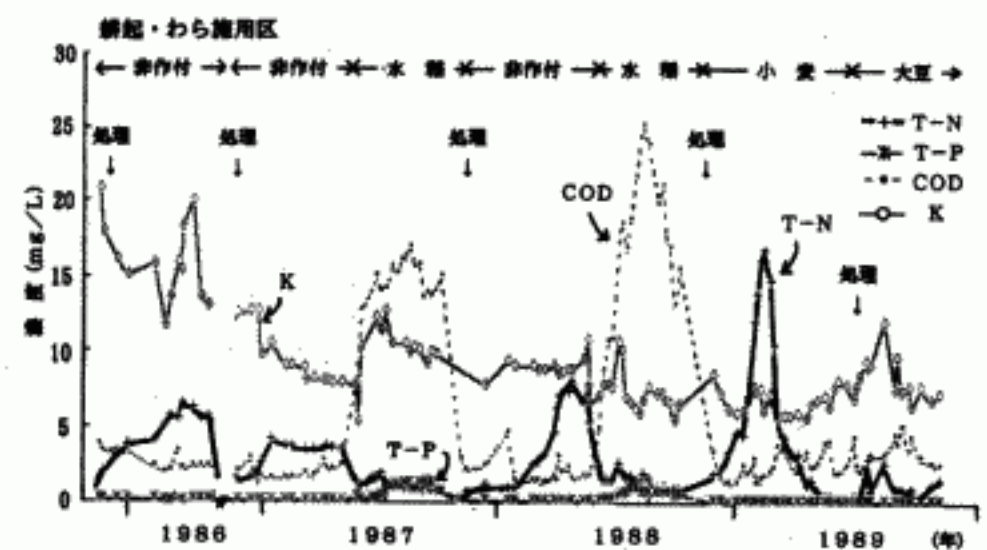


図1-4 期間中の浸透排水水質の推移(区番4)

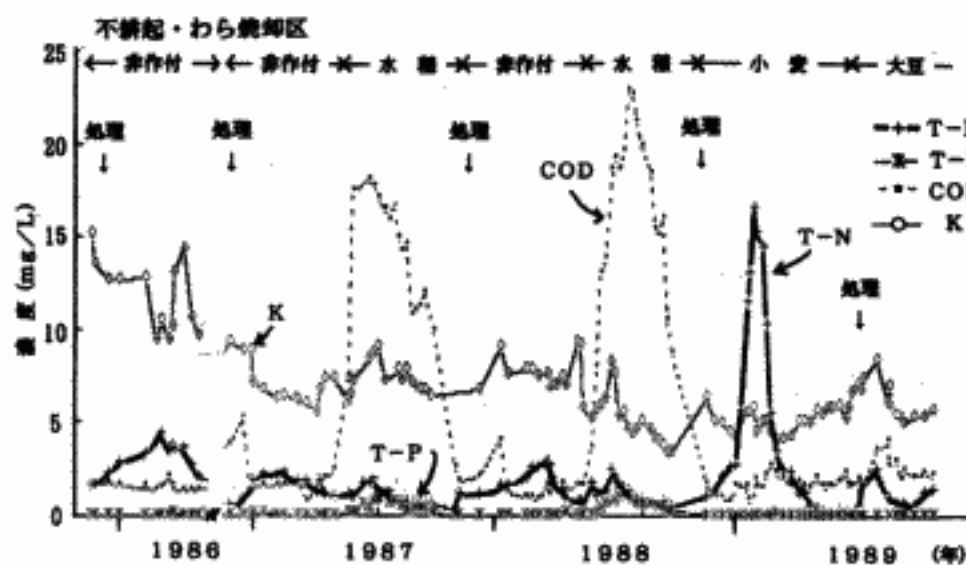


図1-2 期間中の浸透排水水質の推移(区番2)

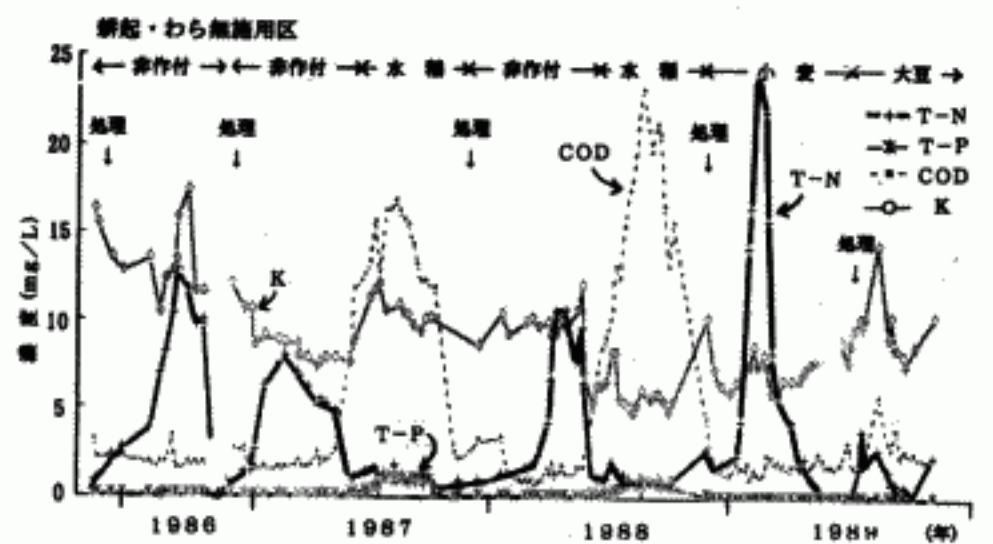


図1-5 期間中の浸透排水水質の推移(区番5)

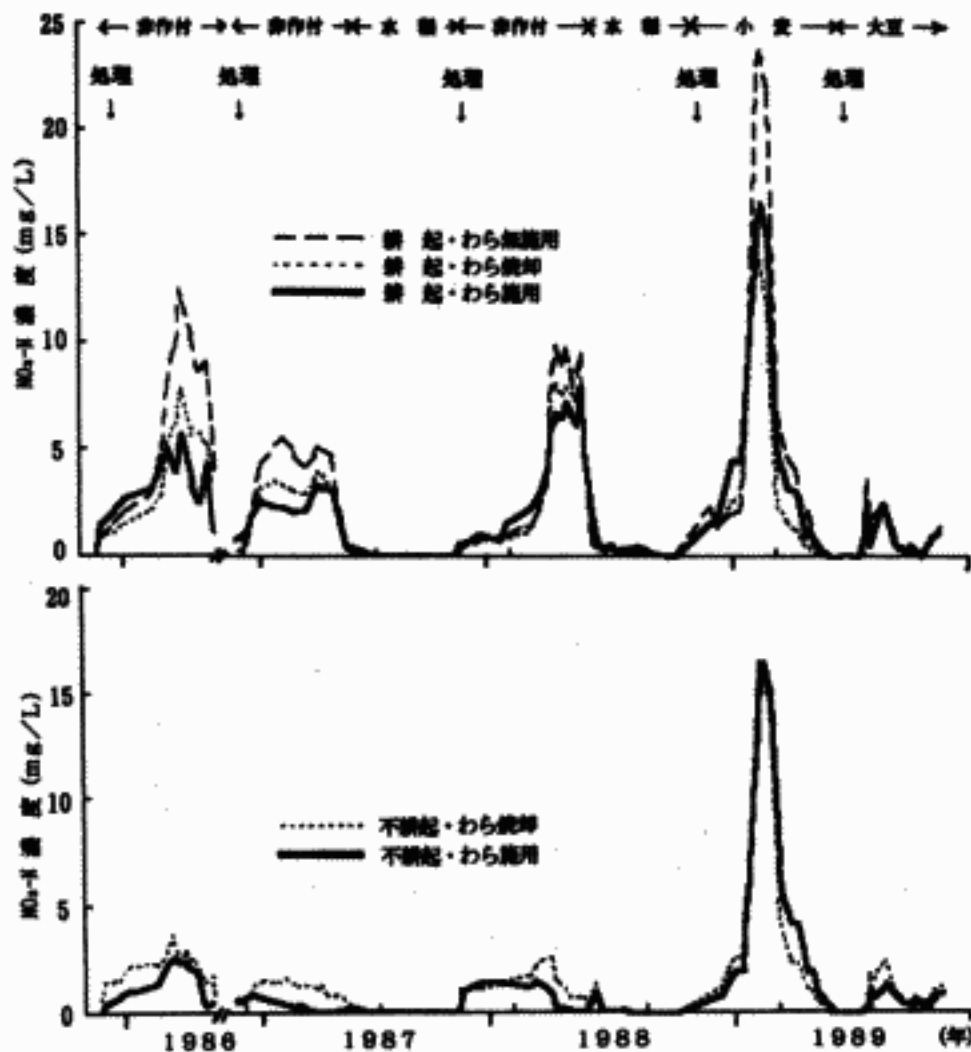


図1-6 浸透排水の硝酸態窒素濃度の推移

3.3 水質汚濁成分の差し引き排出量

各作付期の流入負荷量、流出負荷量および差し引き排出量を表5-1～5に示す。

T-Nについては、差し引き排出量の全区平均値が、水稲作付期に $-0.17 \sim 0.43 \text{ gN/m}^2$ と低く、水稲非作付期には $1.25 \sim 2.22$ に、また小麦作期には 4.60 に増加した。しかし、大豆作期には 0.21 gN/m^2 と低くなった。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ についても水稲非作付期に $0.94 \sim 1.74$ 、小麦作期に 4.47 gN/m^2 と増加し、T-Nに占める割合も水稲非作付期 $75 \sim 92\%$ 、小麦作 97% と高かった。なお、水稲作付期には $-0.57 \sim -0.82 \text{ gN/m}^2$ となった。

表4 水稲作付期における地表排水の水質
(加重平均、 mg/L)

年次	区番	COD	T-N	$\text{NO}_3\text{-N}$	T-P	K
1987	1	9.3	1.00	0.07	0.240	4.8
	2	6.9	1.18	0.10	0.225	3.9
	3	6.5	1.14	0.09	0.241	4.6
	4	7.7	1.37	0.13	0.220	5.4
	5	6.4	1.28	0.13	0.274	3.5
1988	1	10.6	1.45	0.06	0.226	3.7
	2	8.7	1.10	0.06	0.234	3.1
	3	8.0	1.02	0.06	0.194	3.4
	4	7.9	0.99	0.05	0.201	3.9
	5	7.4	0.93	0.06	0.256	2.6

T-Pについては、水稲作付期が $0.309 \sim 0.353 \text{ gP/m}^2$ と高かったが(2作目、3作目)、水稲非作付期には $0.007 \sim 0.009$ 、小麦作期 0.020 、大豆作期 0.018 gP/m^2 と低くなった。

CODについても同様に、水稲作付期が $7.9 \sim 11.6 \text{ g/m}^2$ と高かったのに対し、水稲非作付期に $0.51 \sim 0.83$ 、小麦作期に 1.44 、大豆作期に 1.88 g/m^2 と低くなった。なお、Kについては作付時期による差は少なく、 $2.6 \sim 5.6 \text{ g/m}^2$ の範囲にあった。

つぎに、耕起、わら処理による差し引き排出量の差異をみると、3.2節で述べたようにT-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ については耕起>不耕起、わら無施用>焼却>施用となり、処理によって明らかな差異が認められたが、COD、T-P、Kについては大差なかった。その結果、耕起およびわら施用によるT-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出軽

表5-1 窒素の差し引き排出量

(gN/m²)

区番	非作付 ¹		水 稲 作 ²				非作付 ³		水 稲 作 ³			小麦 ⁴		大 豆 ⁴		全期間
	浸透 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	差引 排出	
1	1.21	0.33	0.92	0.44	0.25	-0.23	0.28	0.70	0.58	0.79	0.67	4.64	0.33	0.46	0.13	7.25
2	1.42	0.70	0.92	0.46	0.30	-0.16	0.53	0.70	0.49	0.60	0.39	4.27	0.33	0.54	0.21	7.47
3	2.72	1.64	0.92	0.41	0.29	-0.22	1.80	0.70	0.45	0.55	0.30	3.60	0.33	0.40	0.07	9.95
4	2.11	1.35	0.92	0.48	0.35	-0.09	1.64	0.70	0.66	0.54	0.50	4.63	0.33	0.61	0.28	10.63
5	3.62	2.24	0.92	0.45	0.32	-0.15	2.01	0.70	0.49	0.51	0.30	5.85	0.33	0.68	0.35	14.30
平均	2.22	1.25	0.92	0.45	0.30	-0.17	1.25	0.70	0.53	0.60	0.43	4.60	0.33	0.54	0.21	9.92

注：1) 1年目の水稲作付期の差し引き排出量は、2年目と3年目の平均値とし、全期間の差し引き排出量を算出した。

2) 作付期の肩数字1～4は、試験開始後の年次を示す。

水田におけるわら施用が排水水質および土壌微生物に及ぼす影響

表5-2 硝酸態窒素の差し引き排出量

(gN/m²)

区番	非作付 ¹ 非作付 ²		水 稲 作 ²				非作付 ³	水 稲 作 ³				小麦 ⁴	大 豆 ⁴				全期間
	浸透 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出		浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	差引 排出	
1	0.75	0.18	0.88	0.03	0.02	-0.83	0.25	0.67	0.04	0.03	-0.60	4.49	0.32	0.37	0.05	3.58	
2	1.05	0.52	0.88	0.03	0.02	-0.83	0.47	0.67	0.06	0.03	-0.58	4.18	0.32	0.45	0.13	4.24	
3	1.99	1.23	0.88	0.03	0.02	-0.83	1.66	0.67	0.06	0.03	-0.58	3.49	0.32	0.34	0.02	6.28	
4	1.59	1.03	0.88	0.03	0.02	-0.81	1.52	0.67	0.10	0.03	-0.54	4.46	0.32	0.46	0.14	6.72	
5	3.31	1.72	0.88	0.03	0.02	-0.82	1.86	0.67	0.07	0.03	-0.57	5.74	0.32	0.59	0.27	10.82	
平均	1.74	0.94	0.88	0.03	0.02	-0.82	1.15	0.67	0.07	0.03	-0.57	4.47	0.32	0.44	0.12	6.32	

注：1) 1年目の水稲作付期の差し引き排出量は、2年目と3年目の平均値とし、全期間の差し引き排出量を算出した。
2) 作付期の肩数字1～4は、試験開始後の年次を示す。

表5-3 リンの差し引き排出量

(gP/m²)

区番	非作付 ¹ 非作付 ²		水 稲 作 ²				非作付 ³	水 稲 作 ³				小麦 ⁴	大 豆 ⁴				全期間
	浸透 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出		浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	差引 排出	
1	0.005	0.006	0.005	0.187	0.061	0.243	0.006	0.004	0.248	0.123	0.367	0.018	0.009	0.024	0.015	0.965	
2	0.007	0.010	0.005	0.196	0.057	0.248	0.006	0.004	0.225	0.128	0.349	0.016	0.009	0.020	0.011	0.946	
3	0.006	0.008	0.005	0.223	0.061	0.279	0.006	0.004	0.204	0.106	0.306	0.013	0.009	0.019	0.010	0.921	
4	0.010	0.011	0.005	0.374	0.056	0.425	0.011	0.004	0.260	0.110	0.366	0.031	0.009	0.043	0.034	1.284	
5	0.012	0.011	0.005	0.287	0.069	0.351	0.008	0.004	0.242	0.140	0.378	0.022	0.009	0.030	0.021	1.168	
平均	0.008	0.009	0.005	0.253	0.061	0.309	0.007	0.004	0.236	0.121	0.353	0.020	0.009	0.027	0.018	1.056	

注) 同上。

表5-4 CODの差し引き排出量

(g/m²)

区番	非作付 ¹ 非作付 ²		水 稲 作 ²				非作付 ³	水 稲 作 ³				小麦 ⁴	大 豆 ⁴				全期間
	浸透 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出		浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	差引 排出	
1	0.79	0.68	0.67	6.53	2.36	8.22	0.53	0.51	7.84	5.77	13.10	1.20	0.23	1.92	1.69	36.87	
2	0.74	0.77	0.67	6.63	1.75	7.71	0.51	0.51	7.10	4.72	11.31	1.32	0.23	1.85	1.62	33.49	
3	0.70	0.65	0.67	6.37	1.65	7.35	0.40	0.51	6.77	4.33	10.59	1.16	0.23	1.82	1.59	31.41	
4	1.06	0.82	0.67	7.20	1.96	8.49	0.62	0.51	8.18	4.32	11.99	2.10	0.23	2.99	2.76	38.08	
5	0.88	0.81	0.67	6.59	1.61	7.53	0.49	0.51	7.32	4.03	10.84	1.41	0.23	1.99	1.76	32.91	
平均	0.83	0.75	0.67	6.66	1.87	7.86	0.51	0.51	7.44	4.63	11.57	1.44	0.23	2.11	1.88	34.55	

注) 同上。

表5-5 カリウムの差し引き排出量

(g/m²)

区番	非作付 ¹ 非作付 ²		水 稲 作 ²				非作付 ³	水 稲 作 ³				小麦 ⁴	大 豆 ⁴				全期間
	浸透 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出		浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	地表 排出	差引 排出	浸透 排出	用水 流入	浸透 排出	差引 排出	
1	4.87	2.87	0.83	2.83	1.20	3.20	2.33	0.63	2.27	2.01	3.65	3.53	0.09	3.46	3.37	27.25	
2	5.45	2.92	0.83	3.73	1.00	3.90	2.39	0.63	2.38	1.69	3.44	3.96	0.09	3.97	3.88	29.61	
3	5.89	3.44	0.83	4.12	1.15	4.44	2.57	0.63	2.59	1.85	3.81	4.79	0.09	4.86	4.77	33.84	
4	6.31	3.72	0.83	5.29	1.37	5.83	2.72	0.63	3.56	2.13	5.06	5.40	0.09	5.56	5.47	39.96	
5	5.47	3.50	0.83	5.27	0.88	5.32	2.85	0.63	2.85	1.42	3.64	5.48	0.09	5.88	5.79	36.53	
平均	5.60	3.29	0.83	4.25	1.12	4.54	2.57	0.63	2.73	1.82	3.92	4.63	0.09	4.75	4.66	33.44	

注) 同上。

減量（耕起・わら無施用区（区番 5）との差）は 4 か年の平均値で、耕起・わら施用区（区番 4）0.91、1.02 gN/m²、不耕起・わら施用区（区番 1）1.76、1.81gN/m²であった。なお、耕起・わら施用区の NO₃-N 流出軽減率（（耕起・わら無施用区－耕起・わら施用区）／（耕起・わら無施用区））は、1 年目 52%、2 年目 40%、3 年目 18% となり、経年的に低下した。

N 流出軽減効果が高かった 1 年目、2 年目の水稲非作付期には、不耕起処理区の N 流出量が低かったのに対し、耕起処理区では 12 月下旬～ 3 月下旬にかけて増加したが、稲わら施用によって N 流出が軽減された（図 2）。これは、耕起によって土壤中の易分解性有機態 N の無機化が促進された反面、耕起処理区では稲わら施用によって無機化 N の有機化あるいは脱窒が促進されたためと考えられる。

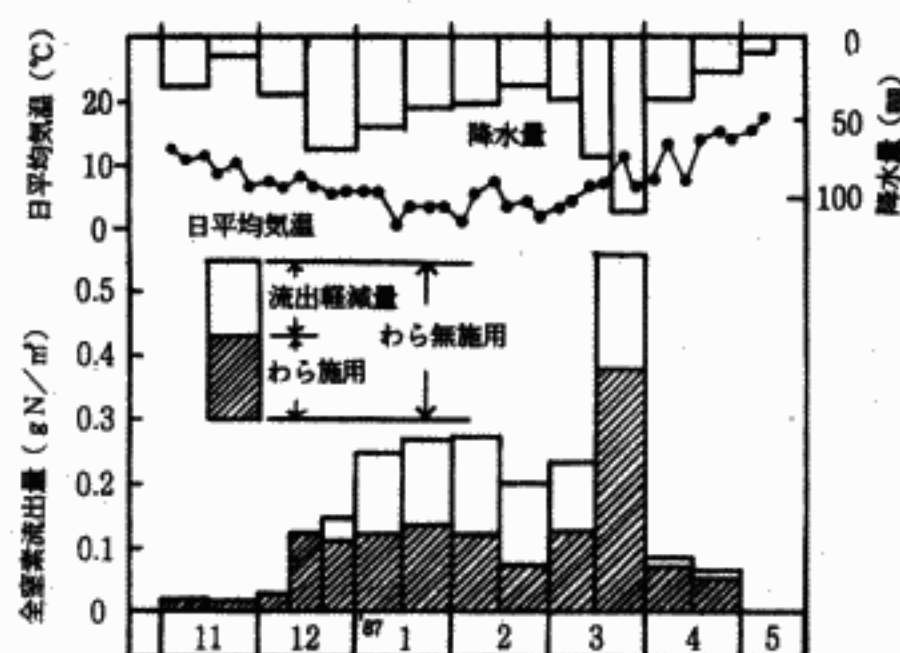


図 2 耕起区における時期別の窒素流出量と稲わら施用による流出軽減効果

また、耕起区の時期別 N 流出量は、年次によってピークとなる時期が異なり、総降水量の多かった 1 年目の水稲非作付期には、T-N、NO₃-N の総流出量も多かった。これに対して、小麦・大豆作期の N 流出量は、生育初期に増加し、これは基肥の影響によるものと考えられる。

日当たりの差し引き排出量（g/ha/d）を、表 6-1～5 に示す。

T-N については、水稲作付期-13～37、水稲非作付期 15～195、小麦作 151～246、大豆作 5～27gN/ha/d の範囲にあり、栽培作物、耕起および稲わら処理の差による変動が大きかった。また、年平均でみると、連続水田では 22.6～73.9、輪換畑では 100～168gN/ha/d となった。現在、滋賀県が採用している農耕地からの窒素の発生負荷原単位は、水田 52.1、畑 308 gN/ha/d となっており、本試験の結果から、連続水田でも非作付期の土壌管理法によって原単位の 0.4～1.4 倍に変動すること、また輪換畑での小麦・大豆作体系は連続水田の 1.9～3.2 倍に増加するが、畑の原単位の 0.3～0.5 倍に低下することが示唆された。

T-P については、水稲作付期に 13.5～23.6 gP/ha/d と高くなったが、水稲非作付期には 0.3～0.6 と低く、連続水田の年平均は 8.1～11.1gP/ha/d となった。また、小麦作 0.5～1.3、大豆作 0.8～2.6 となり、輪換畑の年平均は 0.6～1.8 gP/ha/d と低かった。滋賀県が採用しているリンの発生負荷原単位は、水田 3.5、畑 18.4 gP/ha/d であり、連続水田では原単位よりも高かったが、輪換畑は畑の原単位よりも低かった。本試験では、供試土壌の有効態リン酸含量が比較

表 6-1 窒素の日当たり差し引き排出量

（gN/ha/日、用水負荷差し引き発生負荷量）

区番	連 続 水 田					輪 換 畑		平 均 値				
	非作付 ¹	非作付 ²	水稲作 ²	非作付 ³	水稲作 ³	小 麦 ⁴	大 豆 ⁴	連続水田（3 か年）	輪換畑	全期間		
								非作付	水稲	年間	年間	年間
1	65.1	17.7	-12.8	15.1	37.4	195.0	9.9	32.6	12.3	22.6	129.3	49.3
2	76.3	37.6	-8.9	28.5	21.8	179.4	16.0	47.5	6.4	27.4	121.4	50.9
3	146.3	88.2	-12.3	96.8	16.8	151.3	5.3	110.4	2.2	57.4	99.5	67.9
4	113.4	72.6	-5.0	88.2	27.9	194.5	21.4	91.4	11.5	52.2	133.1	72.4
5	194.6	120.4	-8.4	108.1	16.8	245.8	26.7	141.0	4.2	73.9	168.0	97.5
平均	119.1	67.3	-9.5	67.3	24.1	193.2	15.9	84.6	7.3	46.7	130.2	67.6

注：1）1 年目の水稲作付期の差し引き排出量は、2 年目と 3 年目の平均値とし、連続水田（3 か年）の差し引き排出量を算出した。

2）作付期の肩数字は、試験開始後の年次を示す。

水田におけるわら施用が排水水質および土壌微生物に及ぼす影響

的高く、湛水によってリンが可給化され、溶出され易くなること、また追肥施用直後の降雨によって肥料の溢流があったことなどが連続水田の増加要因として考えられる。さらに、現在の畑の原単位は過大であると考えられるが^{23, 27)}、ライシメータ試験は実際圃場とは異なり、降雨時の地表排水がなく、土壌粒子などの懸濁物質が流出しなかったことも考慮する必要がある。

CODについては、リンと同様、水稻作付期に411～732であったのに対し、非作付期には22～57g/ha/dと低かった。また、小麦作期も低かったが、大豆

作期には121～211g/ha/dに増加した。年平均で見ると、連続水田262～310、輪換畑75～132g/ha/dとなり、湛水条件下では還元過程の進行に伴う2価鉄および有機酸の溶出、輪換畑では夏期の温度上昇や降雨による水溶性有機物の増加などが影響しているものと考えられる。

Kについては、水稻の作付期と非作付期で大差なく、年平均で連続水田は186～266g/ha/dとなった。また、輪換畑の小麦・大豆体系は年平均で187～305g/ha/dとなり、連続水田と大差なかった。

表6-2 リンの日当たり差し引き排出量

(gP/ha/日、用水負荷差し引き発生負荷量)

区番	連 続 水 田					輪 換 畑		平 均 値				
								連続水田 (3か年)			輪換畑	全期間
	非作付 ¹	非作付 ²	水稻作 ²	非作付 ³	水稻作 ³	小 麦 ⁴	大 豆 ⁴	非作付	水稻	年間	年間	年間
1	0.3	0.3	13.5	0.3	20.3	0.8	1.1	0.3	16.9	8.4	0.9	6.6
2	0.4	0.5	13.7	0.3	19.3	0.7	0.8	0.4	16.5	8.3	0.7	6.4
3	0.3	0.4	15.5	0.3	16.9	0.5	0.8	0.4	16.2	8.1	0.6	6.3
4	0.5	0.6	23.6	0.6	20.3	1.3	2.6	0.6	22.0	11.1	1.8	8.7
5	0.6	0.6	19.5	0.4	20.9	0.9	1.6	0.6	20.2	10.2	1.2	7.9
平均	0.4	0.5	17.2	0.4	19.6	0.8	1.4	0.4	18.4	9.2	1.0	7.2

表6-3 CODの日当たり差し引き排出量

(g/ha/日、用水負荷差し引き発生負荷量)

区番	連 続 水 田					輪 換 畑		平 均 値				
								連続水田 (3か年)			輪換畑	全期間
	非作付 ¹	非作付 ²	水稻作 ²	非作付 ³	水稻作 ³	小 麦 ⁴	大 豆 ⁴	非作付	水稻	年間	年間	年間
1	42.5	36.6	459.2	28.5	731.8	50.4	129.0	35.8	585.5	310.3	78.3	252.3
2	39.8	41.4	430.7	27.4	631.8	55.5	123.7	36.2	531.3	279.0	79.7	229.2
3	37.6	34.9	410.6	21.5	591.6	48.7	121.4	31.4	501.1	261.7	74.5	214.9
4	57.0	44.1	474.3	33.3	669.8	88.2	210.7	44.8	572.1	303.4	131.7	260.5
5	47.3	43.5	420.7	26.3	605.6	59.2	134.4	39.1	513.1	271.6	85.9	225.1
平均	44.8	40.1	439.1	27.4	646.1	60.4	143.8	37.5	542.6	285.2	90.0	236.4

表6-4 カリウムの日当たり差し引き排出量

(g/ha/日、用水負荷差し引き発生負荷量)

区番	連 続 水 田					輪 換 畑		平 均 値				
								連続水田 (3か年)			輪換畑	全期間
	非作付 ¹	非作付 ²	水稻作 ²	非作付 ³	水稻作 ³	小 麦 ⁴	大 豆 ⁴	非作付	水稻	年間	年間	年間
1	261.8	154.3	178.8	125.3	203.9	148.3	257.3	180.5	191.3	185.8	187.0	186.1
2	293.0	157.0	217.9	128.5	192.2	166.4	296.2	192.8	205.0	198.8	212.5	202.2
3	316.7	184.9	248.0	138.2	212.8	201.3	364.1	213.3	230.4	221.7	259.1	231.0
4	339.2	200.0	325.7	146.2	282.7	226.9	417.6	228.5	304.2	265.6	294.6	272.9
5	294.1	188.2	297.2	153.2	203.4	230.3	442.0	211.8	250.3	230.7	305.4	249.4
平均	301.0	176.9	253.5	138.3	219.0	194.6	355.4	205.4	236.3	220.5	251.7	228.3

3.4 水稻非作付期における雑草の生育量と養分吸収量

不耕起区では、スズメノテッポウを主とする雑草が繁茂し、乾物重（3か年の平均値）は132～134g/m²であった（表7）。一方、耕起区では、33～76g/m²と生育が抑制され、耕起・わら施用区が最も少なかった。その結果、田植え前の有機物鋤込み量（放置稲わら+雑草）は、不耕起区で多く、有機物のC/N比も高かった。

雑草の養分吸収量は、3か年平均で、N0.7～1.4、P0.13～0.46、K1.0～2.9g/m²の範囲にあった。不耕起処理によるN吸収量の増加をみると、わら施用区で0.72、わら焼却区で0.28gN/m²となり、水稻非作付期における浸透排出の軽減量（3か年平均）の65%、24%にそれぞれ相当した。

3.5 作物の生育収量と養分吸収量

各作物の収量を、耕起・わら無施用区に対する指数として表8に示す。

表7 雑草の生育量および成分吸収量

(g/m²)

区番	試験区	雑草生育量（乾物重）				成分吸収量（平均）			有機物のC/N比*
		1986	1987	1988	平均	N	P	K	
1	不耕起・わら施用	100	136(84)	165(137)	134	1.40	0.45	2.81	59.1
2	不耕起・わら焼却	94	136(107)	167(144)	132	1.29	0.46	2.89	52.5
3	耕起・わら焼却	24	97(43)	106(80)	76	1.01	0.26	1.90	23.7
4	耕起・わら施用	13	45(14)	41(16)	33	0.68	0.13	0.97	18.5
5	耕起・わら無施用	12	77(26)	79(49)	56	0.90	0.23	1.67	20.8

注：1）雑草生育量の（ ）内は、スズメノテッポウの生育量を示す。

2）* 田植え前に鋤込んだ有機物（雑草+放置稲わら）のC/N比を示す。

表8 作物の収量指数および成分吸収量

区番	試験区名	水 稻			小麦	大豆	全作	水稻のN吸収量(g/m ²)			水稻のP吸収量(g/m ²)		
		1986	1987	1988	1989	1989	平均	1986	1987	1988	1986	1987	1988
1	不耕起・わら施用	91	95	113	93	107	100	10.4	13.6	14.5	2.62	2.93	3.24
2	不耕起・わら焼却	96	99	109	102	109	103	11.6	13.6	14.3	2.92	3.16	2.95
3	耕起・わら焼却	94	101	108	115	114	107	12.7	14.5	13.9	3.05	3.11	2.93
4	耕起・わら施用	101	104	109	111	114	108	13.0	14.4	14.3	3.08	3.02	3.08
5	耕起・わら無施用	100	100	100	100	100	100	13.0	14.7	13.2	3.11	3.01	3.03

注：1）収量は区番5を100とした指数。なお、区番5の収量実数（g/m²）は、1986年水稻（精玄米）：700、1987年水稻：765、1988年水稻：671、1989年小麦（精子実重）：382、大豆（子実重）：359。

2）小麦、大豆の成分吸収量は、表9に示す。

まず、水稻については、不耕起処理区で1年目に4～9%減収するものの、2年目には減収率が1～5%に軽減され、3年目には9～13%の増収に転じた。不耕起・わら施用区では分けつ期に土壌の酸化還元電位が低くなり、わきが観察されるなど初期生育が明らかに抑制された。なお、3年目に増収効果が認められたのは、後述するように、土壌中に易分解性有機態Nが増加し、N肥沃度が向上したことによると考えられる。

一方、耕起処理区ではわら施用>焼却>無施用とな

り、稲わら施用による増収効果は経年的に向上し、3年目には9%となった。耕起・わら施用区では、耕起・わら無施用区に比べて、初期生育がやや抑制されるものの、有効茎歩合、籾/わら比が向上し、秋優り的な生育相となったことが好影響を及ぼしたと考えられる。

小麦については、水稻非作付期の不耕起処理区では、耕起・わら施用区に比べて増収効果が認められなかったが、耕起処理区ではわら施用およびその焼却後施用によって11～15%増収した。大豆についても、水稻非

作付期の耕起処理区において、稲わら・麦わら施用およびそれらの焼却後施用によって14%増収した。

したがって、全期間の平均収量指数は、耕起・わら施用区が最も高く、増収効果も経年的に向上した。

作物のN吸収量は、耕起・わら施用区で増加したものの、処理間に大差は認められなかった。また、P吸収量は、収量とよく対応したが、K吸収量（データ略）は処理による差がほとんど認められなかった。

3.6 窒素、リン、カリウムの収支

4年間の各成分の収支を表9-1～3に示す。収入は、降水および用水からの流入量、作物残渣および肥料の施用量であり、支出は、浸透排出および地表排出による流出量と作物吸収量である。

まず、Nについては、期間中の収入合計が48～66g/m²、支出は82～90g/m²となり、支出超過となった。これは、空中窒素固定による収入、脱窒による支出を考慮しておらず、大豆作では窒素固定量の多いことが影響したと考えられる。

そこで、連続水田の3年間についてN収支をとると、耕起・わら無施用区、耕起・わら焼却区ではそれぞれ-16.5、-12.2g/m²と明らかに支出が上回った。しか

し、耕起・わら施用区では-3.2g/m²と支出の超過が減少し、不耕起・わら施用区では3.1g/m²と収入が上回っており、耕起・わら無施用区に対する増加量は、それぞれ13.3、19.6g/m²であった。施用有機物量と水稻吸収量を考慮すると、耕起・わら施用区では、非作付期に有機化が促進されるとともに、それらが稲作期間中に再無機化され、水稻に有効に吸収されたこと、それに対して不耕起・わら施用区では非作付期の無機化されたNの流出が少ないものの、稲作期間中に有機化が顕著に促進され、水稻の吸収が抑制されたことによると推察される。なお、施肥量に対するN流出量の割合（肥料の流出率）は、全区平均で、連続水田25%、輪換畑43%となり、全期間で30%であった（表10）。

Pについては、小麦・大豆作の畑状態下では収入が上回り、不耕起>耕起の傾向が認められるものの、耕起・わら無施用区を除いて全期間の収支バランスがほぼとれていた。Kについても、Pと同様に不耕起>耕起の傾向が認められるものの、耕起・わら無施用区では、稲わら施用量に相当するKのマイナス量が顕著であった。なお、肥料の流出率は、全期間の全区平均で、P 9%、K88%となった。

表9-1 窒素の収支

(gN/m²)

区番	収 入					支 出								収 支		
	降水	用水	有機物	肥料	収入合計	吸 収				流 出			支出合計	連続水田	輪換畑	全期間
						水稻	小麦	大豆	計	浸透	地表	計				
1	3.6	2.8	17.8	42.0	66.0	38.5	6.8	26.6	71.9	8.5	1.6	10.1	82.0	3.1	-19.1	-16.0
2	3.6	2.8	4.9	42.0	53.3	39.5	6.4	27.0	72.9	8.9	1.4	10.3	83.2	-7.3	-22.6	-29.9
3	3.6	2.8	4.9	42.0	53.3	41.1	7.6	24.9	73.6	11.5	1.3	12.8	86.4	-12.2	-20.9	-33.1
4	3.6	2.8	17.6	42.0	66.0	41.7	7.3	27.4	76.4	12.1	1.3	13.4	89.8	-3.2	-20.6	-23.8
5	3.6	2.8	—	42.0	48.4	40.9	6.6	25.8	73.3	15.8	1.3	17.1	90.4	-16.5	-25.5	-42.0
平均	3.6	2.8	9.0	42.0	57.4	40.3	6.9	26.3	73.6	11.4	1.4	12.7	86.4	-7.2	-21.7	-29.0

表9-2 リンの収支

(gP/m²)

区番	収 入					支 出								収 支		
	降水	用水	有機物	肥料	収入合計	吸 収				流 出			支出合計	連続水田	輪換畑	全期間
						水稻	小麦	大豆	計	浸透	地表	計				
1	0.10	0.02	3.16	12.66	15.94	8.79	1.59	2.87	13.25	0.71	0.28	0.99	14.24	0.24	1.46	1.70
2	0.10	0.02	3.16	12.66	15.94	9.03	1.68	2.95	13.66	0.69	0.28	0.97	14.63	0.01	1.30	1.31
3	0.10	0.02	3.16	12.66	15.94	9.09	1.81	3.01	13.91	0.69	0.25	0.94	14.85	-0.02	1.11	1.09
4	0.10	0.02	3.16	12.66	15.94	9.18	1.85	3.03	14.06	1.06	0.25	1.31	15.37	-0.43	1.00	0.57
5	0.10	0.02	—	12.66	12.78	9.15	1.13	2.78	13.06	0.88	0.31	1.19	14.25	-2.34	0.87	-1.47
平均	0.10	0.02	2.53	12.66	15.31	9.05	1.61	2.93	13.59	0.81	0.27	1.08	14.67	-0.51	1.15	0.64

表 9-3 カリウムの収支

 (g/m²)

区番	収 入					支 出								収 支		
	降水	用水	有機物	肥料	収入合計	吸 収				流 出			支出合計	連続水田	輪換畑	全期間
						水稻	小麦	大豆	計	浸透	地表	計				
1	0.5	2.3	47.0	40.8	90.6	45.3	6.0	9.8	61.1	24.7	4.8	29.5	90.6	-6.3	6.3	0.0
2	0.5	2.3	47.0	40.8	90.6	45.0	6.3	10.0	61.3	27.9	4.0	31.9	93.2	-7.4	4.8	-2.6
3	0.5	2.3	47.0	40.8	90.6	45.6	6.7	10.3	62.6	31.6	4.5	36.1	98.7	-10.6	2.5	-8.1
4	0.5	2.3	47.0	40.8	90.6	46.5	6.8	10.4	63.7	37.0	5.3	42.3	106.0	-16.3	0.9	-15.4
5	0.5	2.3	—	40.8	43.6	47.7	6.0	9.5	63.2	35.4	3.5	38.9	102.1	-45.2	-13.3	-58.5
平均	0.5	2.3	37.6	40.8	81.2	46.0	6.4	10.0	62.4	31.3	4.4	35.7	98.1	-17.2	0.2	-16.9

表 10 肥料の流出率 (年間の平均値)

区番	試 験 区 名	N			P			K		
		連 続 水 田	輪換畑	全期間	連 続 水 田	輪換畑	全期間	連 続 水 田	輪換畑	全期間
1	不耕起・わら施用	0.17	0.43	0.24	0.12	0.01	0.08	0.82	0.52	0.72
2	不耕起・わら焼却	0.18	0.40	0.25	0.12	0.01	0.08	0.87	0.60	0.78
3	耕 起・わら焼却	0.29	0.33	0.30	0.12	0.01	0.07	0.97	0.72	0.88
4	耕 起・わら施用	0.27	0.44	0.32	0.16	0.02	0.10	1.14	0.82	1.04
5	耕 起・わら無施用	0.35	0.54	0.41	0.15	0.01	0.09	1.00	0.85	0.95
	平 均	0.25	0.43	0.30	0.13	0.01	0.09	0.96	0.70	0.88

注) 肥料の流出率=流出量/施肥量。

3.7 土壤微生物に及ぼす影響

3.7.1 水稻非作付期の耕起・稲わら処理が土壤微生物相およびアンモニア化成量に及ぼす影響

水稻 2 作跡地土壤の微生物相を表 11 に示す。糸状菌数は、耕起処理による影響が認められず、 $4.2 \sim 5.7 \times 10^4$ 菌数/g 乾土の範囲にあった。また、放線菌も $6.0 \sim 13.9 \times 10^4$ 菌数/g 乾土の範囲にあり、耕起・わら施用区でやや多かった。好気性細菌は、 $8.0 \sim 26.0 \times 10^4$ 菌数/g 乾土の範囲で、不耕起>耕起、わら施用≥焼却≥無施用となる傾向を示した。しかし、好気性

セルロース分解細菌は、 $1.2 \sim 5.7 \times 10^3$ 菌数/g 乾土の範囲にあり、稲わら施用の有無による差は認められず、耕起≥不耕起となった。

硝酸化成に關与する微生物については、アンモニア酸化細菌数が $1.2 \sim 4.6 \times 10^4$ 菌数/g 乾土の範囲にあり、耕起≥不耕起となった。しかし、亜硝酸酸化細菌数は $1.9 \sim 48.8 \times 10^4$ 菌数/g 乾土の範囲にあり、一定の傾向が認められなかった。また、脱窒に關与する硝酸還元菌および脱窒菌については、それぞれ $0.3 \sim 13.7 \times 10^3$ 、 $1.1 \sim 49.2 \times 10^2$ 菌数/g 乾土の範囲にあり、不耕起>耕起となった。

表 11 水稻跡地土壤の微生物相

(菌数/g 乾土)

区番	試験区名	糸状菌	放線菌	好気性細菌	アンモニア酸化細菌	亜硝酸酸化細菌	硝酸還元菌	脱窒菌	好気性セルロース分解細菌
		$\times 10^3$	$\times 10^4$	$\times 10^5$	$\times 10^3$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^2$	$\times 10^3$
1	不耕起・わら施用	53.3	75	260	11.8	25.3	137	49.2	16.4
2	不耕起・わら焼却	48.2	60	226	19.2	48.8	52	35.5	11.5
3	耕 起・わら焼却	56.8	95	98	24.1	3.9	3	1.3	24.1
4	耕 起・わら施用	45.0	139	139	31.5	1.9	9	1.1	57.2
5	耕 起・わら無施用	42.0	87	80	46.2	30.8	3	4.3	45.0

注) 2 年目の水稻収穫 1 か月後に作土を採取 (1987 年 10 月 29 日)。

つぎに、水稻非作付期における土壌微生物相の時期別変化を図3に示す。なお、耕起処理による影響は、耕起・わら無施用区と不耕起・わら施用区の比較により考察した。

糸状菌、放線菌、好気性細菌はいずれも耕起の有無によって変化しなかったが、耕起・わら施用区では12月から明らかに菌数が増加し、2月もほぼ同じ水準にあった。

一方、硝酸還元菌、脱窒菌は耕起によって経時的に増加し、12月にはいずれの区も10月の不耕起・わら施用区と同水準に達した。なお、好気性セルロース分解細菌は、わら施用>無施用の傾向もうかがわれたが、時期的な差は認められなかった。

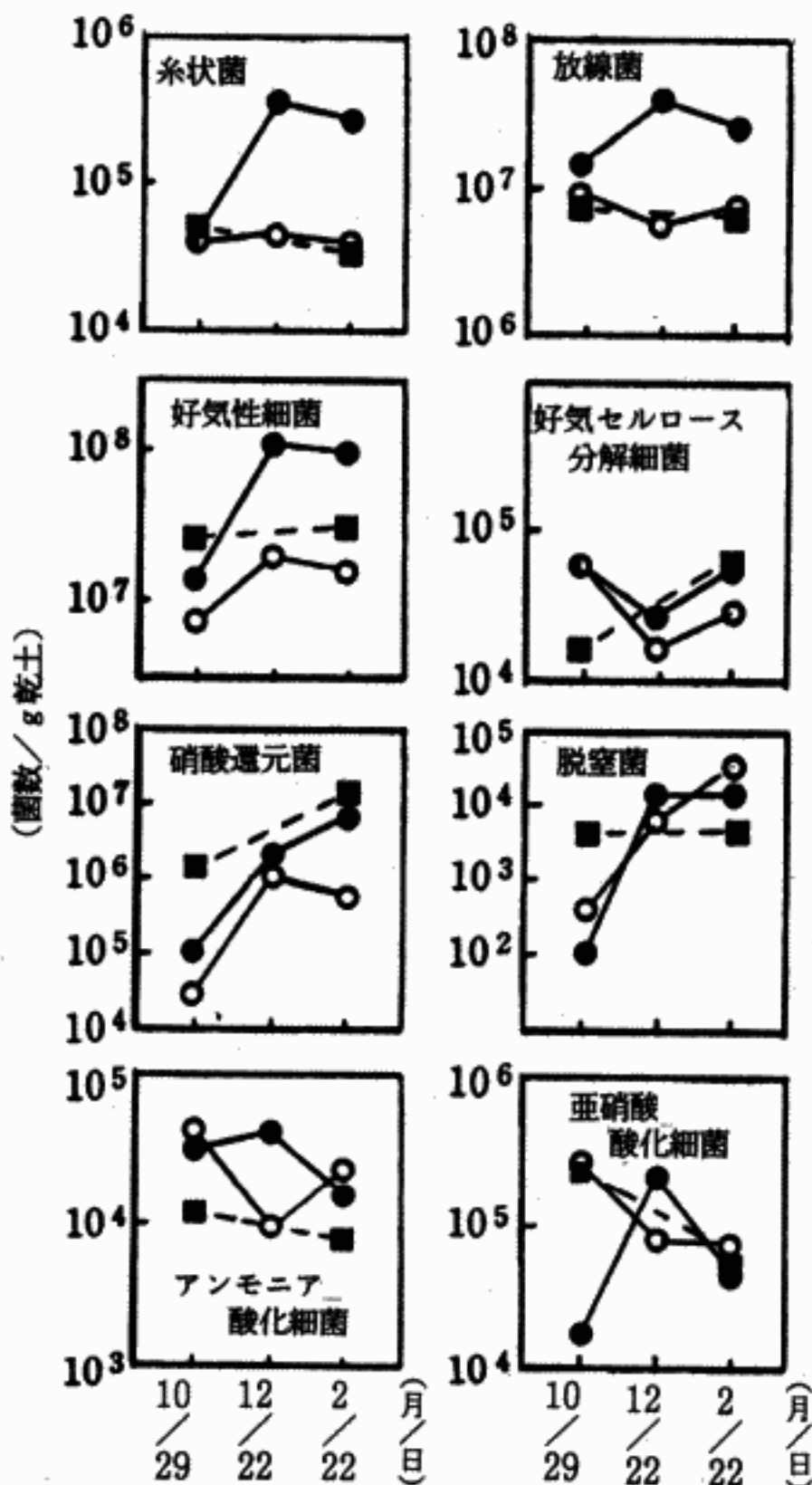


図3 水稻非作付期の耕起、わら施用が土壌微生物相に及ぼす影響 (1987~1988年)

- : 耕起・わら施用
- : 耕起・わら無施用
- : 不耕起・わら施用

このように、水稻非作付期の耕起・わら施用区では糸状菌、放線菌、好気性細菌などの従属栄養微生物が増加したが、硝酸化成に關与するアンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌の変化は少なかった。そこで、耕起・わら施用による土壌微生物相の変化が易分解性有機態Nに及ぼす影響を解析するため、湛水前に作土を採取し、アンモニア化成量を経時的に比較した(図4)。また、アンモニア態Nの生成パターンを類型化するため、吉野³⁰⁾の積算地温による予測式にあてはめ、パラメータを求めた(表12)。

アンモニア化成量は、不耕起>耕起、わら施用>焼却>無施用となり、耕起区では6週以降にわら処理による差が顕著となった。これらの特徴は、予測式のパラメータによく反映し、アンモニア化成量の総量を示すK₁₀₅₀は、不耕起・わら施用>耕起・わら施用>不耕起・わら焼却>耕起・わら焼却>耕起・わら無施用の順になった。また、アンモニア化成の速度あるいはそのパターンを示す次数nは、いずれの区も1未満となり、生成速度が初期に高く、後期に低下するパターンを示した。特に、K₁₀₅₀が低くなった耕起区では、nがわら施用>焼却>無施用となり、わら施用はアンモニア態Nの生成を後期まで持続させた。

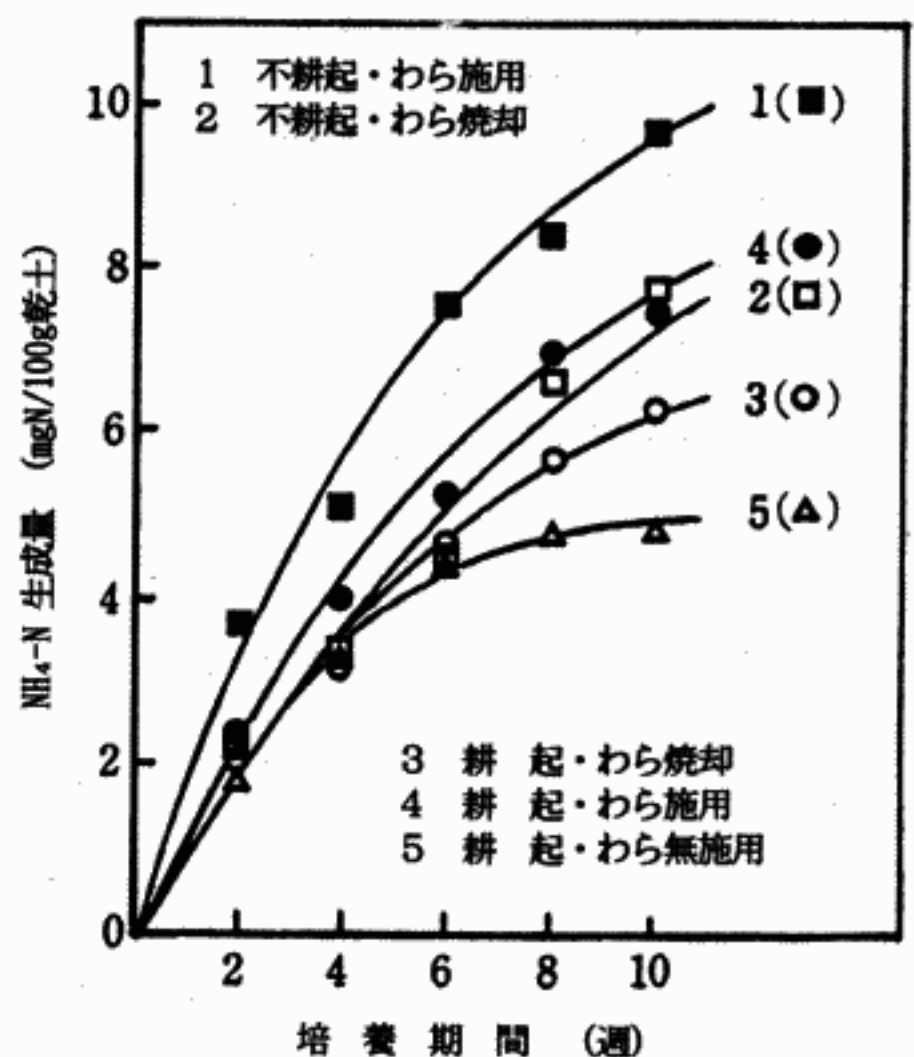


図4 水稻非作付期の耕起、わら施用が湛水前土壌のアンモニア化成量に及ぼす影響 (1988年)
培養条件：湿潤土を30℃で10週間湛水静置培養

滋賀農試の水稲作付期における有効積算地温は、最高分げつ期が350~400℃、成熟期が1100~1200℃の範囲にあり、30℃、10週間の湛水培養により生成するアンモニア態Nは稲作期間中に発現すると考えられる。そこで、 K_{1050} に作土の仮比重と作土深(15cm)を乗じて、単位面積当たりのアンモニア化成量を算出すると、耕起区での稲わら施用によるアンモニア化成の増加量($12.06-9.44=2.62\text{gN}/\text{m}^2$)は、表5-1の水稲非作付期(3年間)におけるT-Nの浸透排出軽減量($7.87-5.10=2.77\text{gN}/\text{m}^2$)にほぼ一致した。

3.7.2 作物残渣の連用が土壤微生物バイオマスに及ぼす影響

4年目の小麦・大豆栽培をさらに1年継続した跡地土壤について、耕起・わら無施用区および耕起・わら施用区の微生物バイオマス进行分析した結果を表13-1に示す。

E_c 、 E_N 、 E_{NIN} およびATPは、いずれも作物残渣の連用により増加し、 E_c 、 E_N の増加割合は、

それぞれ26%、46%であった。また、畑・草地土壤で微生物バイオマス(B_c 、 B_N)を算出するのに用いるファクター($K_c:2.64$ 、 $K_N:2.22$)²⁰が輪換畑でも成り立つと仮定すると、土壤有機物に占める微生物バイオマスの割合は2~3%となった。

そこで、表12の仮比重、作土深(15cm)をもとに、単位面積当たりの値に換算すると、作物残渣連用による微生物バイオマスNの増加量は($(5.79 \times 1.04 - 3.97 \times 1.17) \times 1.5 = 2.06\text{gN}/\text{m}^2$)と算出される。このN量は、表13-2にとりまとめたとおり、5年間のN収支の増加量($-35.2 - (-53.8) = 18.6\text{gN}/\text{m}^2$)の11%にしか過ぎないが、浸透排出の軽減量($22.5 - 20.0 = 2.5\text{gN}/\text{m}^2$)の82%、作物吸収の増加量($96.5 - 90.4 = 6.1\text{gN}/\text{m}^2$)の34%に相当する微生物バイオマスが残存したことを示している。なお、5年目には、作物残渣施用によるNの浸透排出の軽減効果は認められなかったが、これはN肥沃度の差が経年的に拡大した結果によるものと考えられる。

表12 アンモニア化成量の発現パターン

区番	試験区名	予測式のパラメータ		相関係数	作土層の仮比重	10週間の発現予測値(gN/m^2)
		K_{1050}	n			
1	不耕起・わら施用	9.73	0.619	0.988**	1.04	15.18
2	不耕起・わら焼却	7.32	0.739	0.984**	1.04	11.42
3	耕起・わら焼却	6.48	0.709	0.996**	1.12	10.89
4	耕起・わら施用	7.73	0.715	0.997**	1.04	12.06
5	耕起・わら無施用	5.38	0.576	0.963**	1.17	9.44

注：1) 予測式 $Y = K_{1050} \cdot [(T - 15) \cdot D / 1050]^n$ 。

Y ：アンモニア化成量($\text{mgN}/100\text{g}$ 乾土)、 T ：培養温度(℃)、 D ：日数(日)。

2) 10週間の発現予測値は、作土層を15cmとし、 K_{1050} に仮比重を乗じて算出。

表13-1 作物残渣の連用が土壤微生物バイオマスに及ぼす影響

区番	試験区名	T-C %	T-N %	E_c mg/kg	E_N mg/kg	E_{NIN} mg/kg	ATP $\mu\text{mol}/\text{kg}$	B_c mg/kg	B_N mg/kg	$B_c/T-C$ %	$B_N/T-N$ %
4	耕起・わら施用	2.22	0.191	168.1	26.1	9.84	3.78	445	57.9	2.00	3.03
5	耕起・わら無施用	1.98	0.178	133.1	17.9	5.45	1.40	351	39.7	1.77	2.23

注：1) E_c 、 E_N 、 E_{NIN} は、クロロホルム燻蒸により可溶となった有機態炭素、全窒素、ニンヒドリン発色窒素。

2) 微生物バイオマスC(B_c) = $2.64 \times E_c$ 、微生物バイオマスN(B_N) = $2.22 \times E_N$ 。

3) 水稲作3年、小麦・大豆作2年を継続した跡地土壤を採取。

表13-2 窒素の収支(5年間)

(gN/㎡)

区番	試 験 区 名	収 入					支 出								収 支		
		降水	用水	有機物	肥料	収入	作物 吸 収				流 出			支出	連続水田	輪換畑	全期間
							合計	水稻	小麦	大豆	計	浸透	地表				
4	耕起・わら施用	3.6	2.8	22.2	54.0	82.6	41.7	16.4	38.4	96.5	20.0	1.3	21.3	117.8	-3.2	-32.0	-35.2
5	耕起・わら無施用	3.6	2.8	-	54.0	60.4	40.9	14.7	34.8	90.4	22.5	1.3	23.8	114.2	-16.5	-37.3	-53.8

注) 作物吸収量は、水稲3作、小麦2作、大豆2作の合計値を示す。

以上の量的関係から、耕起区では、作物残渣の連用によって従属栄養微生物が増加したが、それらはNの浸透排出軽減量に相当する易分解性有機態Nおよび微生物バイオマスNとして残存し、N肥沃度の維持と作物のN吸収増加に寄与したと考えられる。

4. 総合考察

水稲作付期における水質汚濁成分の差し引き排出負荷量(降雨負荷込み)は、琵琶湖辺の水田群域における12調査事例から、平均値としてN109.6、P 9.6g/ha/dが得られている²³⁾。しかし、非作付期の発生負荷量は、上記の現地調査では把握されておらず、長谷川ら¹⁾が細粒グライ土の稲わら連用田で行った単筆田調査では、非作付期の暗渠からの排出量が、N80.7、P0.9、COD184.9g/ha/dとなり、降雨排出率は58%であった。一方、武田ら²⁷⁾が野洲川沿いの礫質灰色低地土の水田群で行った調査では、非作付期の降雨流出率が地表排出10%、浸透排出55%となり、N104.0、P5.46、COD154.2g/ha/dと高い値が得られている。また、國松ら¹⁰⁾が、細粒灰色低地土の単筆田で調査した結果、透水性が低いため、非作付期には地表排水の降雨流出率が56%と高く、地表排出量がN58.5、P13.83、COD256.8g/ha/dに増大し、排出量の多かったP、CODについては土壌粒子の占める割合が高かったとしている。

ライシメータでの調査事例については、中田ら¹²⁾が細粒灰色低地土を充填して1年間調査し、非作付期にN77.8、P2.21g/ha/dの浸透排出量を得ている。また、國松⁹⁾が同じタイプの土壌を用い、4年間継続調査した結果、非作付期の浸透排出量(平均値)は、N46.7、P1.99g/ha/dであったとしている。

以上の試験圃場では収穫後に耕起を行っており、ま

た現地および単筆田圃場では稲わらは全量鋤込まれている。本試験の耕起・わら施用区では、3か年平均で、N91.4、P0.6、COD44.8g/ha/dであったことから、上述の結果は、非作付期の汚濁成分排出量が決して無視できる量でなく、変動幅が大きいこと、また土壌条件、特に粘土含量や透水性の大小によって土壌有機物の分解・無機化速度や硝酸態Nの流出機構が異なることを示している。また、リンについては、リン酸吸収係数が細粒グライ土(灰色低地土)となっており、粘土鉱物のみならず活性鉄による吸着も浸透排出量に影響を及ぼしていると推察される。

さて、本試験では、非作付期のN排出量が、3か年平均で、不耕起区32.6~47.5、耕起区91.4~141.0gN/ha/dとなり、耕起の有無がT-N、特にNO₃-Nの排出量に大きく影響を及ぼしたが、無機化および硝酸化成の速度は降雨や温度によっても影響を受けると考えられる。芝野²¹⁾は、キャベツを連作したライシメータ試験において、N溶脱量の大部分が降水量で説明でき、寄与率が75%以上であること、また黒ボク土では気温を加味すれば回帰式の寄与率は80%以上になると報告している。また、実際圃場では、降雨時の地表排水中には土壌粒子が混入することも考えられ、耕起と不耕起とを区別して、降水量などの気象条件をパラメータとした回帰式を求めれば¹⁰⁾、土壌類型別にN排出量の類型化や予測が可能となろう。

つぎに、耕起区では、稲わら施用による非作付期のN流出軽減量(3か年平均)が49.6gN/ha/d(0.92gN/㎡)となり、流出軽減率は35%であった。稲わらはC/N比が高く、粗でんぷんやセルロース含量も比較的高いことから、分解も比較的速く、しかも周辺土壌から拡散してくる無機態Nの有機化が促進されるという特徴がある²²⁾。前田ら¹¹⁾は、ガラス繊維濾紙法

を開発し、秋に鴻巣水田土壤に埋設された稲わら粉末は、12月に約15%、湛水前の6月には約45%分解されることを報告している。筆者ら²¹⁾も、滋賀農試圃場では稲わらの分解率が1月末に約25%、5月中旬に約50%になることを確認しており、川村ら⁸⁾も別法ではあるが近似した値を得ている。したがって、西南暖地に位置する本県では、稲わらの腐熟が非作付期中に順調に進んでおり、これは土壤中の従属栄養微生物が年内の比較的早い時期に増殖した本試験結果とも一致する。

土壤中には細菌・糸状菌の細胞壁等に特有な α -アミノ酸含量が高いことから、有機化とアンモニア化成の増加量には土壤微生物菌体とその細胞壁物質の寄与が大きいと考えられている^{6, 7)}。INUBUSHI and WATANABE⁴⁾は、クロロホルム燻蒸・培養法を湛水土壤に適用し、湛水土壤中では微生物バイオマスNがアンモニア化成量と正比例し、水稻生育中期以降のN吸収量とも正の相関関係を示すことを見いだした。筆者ら²⁰⁾も、クロロホルム燻蒸・抽出法を用いて稲作期間中のN動態を解析した結果、稲わらあるいは牛糞堆肥の連用によって増加した微生物バイオマスNは土壤無機化N量の増加量とよく対応することを最近明らかにしている。また、塩田ら²⁵⁾は土壤タイプの異なる転換畑で、転換年数および作付体系と土壤微生物との関係を解析し、微生物バイオマスC、Nは黄色土>灰色台地土>グライ土の順に多く、畑転換に伴う糸状菌数の増加と対応することを報告している。

本試験では、耕起区において稲わら等作物残渣の連用により、4年間に $3.7\text{gN}/\text{m}^2$ の浸透排出が軽減され、作物のN吸収量は $3.1\text{gN}/\text{m}^2$ 増加した。また、3年目には土壤のアンモニア化成量が $2.6\text{gN}/\text{m}^2$ 増加し、5年後には微生物バイオマスNが $2.1\text{gN}/\text{m}^2$ 多く残存していると推定された。これらの量的関係は、微生物バイオマスがNの貯蔵庫と供給源の役割を果たしているという上述の知見をN収支の面から支持していると考えられる。

一方、稲わら施用による硝酸態Nの流出軽減効果には、有機化のほかに脱窒過程が考えられ、谷津田において流入された硝酸態Nが浄化される場合には、脱窒の寄与が大きいとされている^{3, 26)}。しかし、非作付期に流出する硝酸態Nの大部分は土壤有機物が無機化・硝酸化成されたものであり、硝酸態Nよりもアンモニア態Nのほうが微生物によって有機化されやすいことや¹³⁾、稲わら施用によるアンモニア酸化細菌、亜硝酸

酸化細菌への影響が少なかったことから、本試験ではアンモニア態Nからの有機化促進が硝酸態N流出軽減の大きな要因であったと考えられる。

ところで、小麦・大豆作期の硝酸態N流出量は、小麦作で増大し、稲わら施用による小麦作期の流出削減率が21%と低かった。これは、稲わらの連用によって、土壤N肥沃度が無施用区に比べて経年的に向上していることも影響しているが、基本的には基肥由来のN流出が多いことを示唆しており、現地調査³³⁾でもN施肥法を改善する必要性が認められている。この対策技術として筆者ら²¹⁾は、石灰窒素の基肥利用法を検討し、稲わらと石灰窒素の同時鋤込み、後期重点N施肥体系が、硝酸態Nの流出軽減を図りながら、小麦の生産安定と子実蛋白含量の向上に有効なことを認めており、水稻非作付期の硝酸態N流出量と大差ないこともライシメータ試験で確認している。

稲わら施用による水稻の増収効果については、秋期の鋤込みが乾土効果やわらの腐熟を促進させ、稲作時のN飢餓や還元障害を回避すること、また連用することによってN肥沃度が高まり、稲わら堆肥の代替が可能ながことが明らかにされている^{14, 22)}。本試験でも、稲わら連用によって増収効果が経年的に高くなり、土壤のアンモニア化成量も生育初期から後期にかけて安定して生成することが認められたが、これは西南暖地で課題となっている生育後期のN栄養凋落の改善にも少なからず寄与すると期待される。また、小麦、大豆に対しても、脇本ら³⁵⁾が報告しているとおり、稲わら、麦わら等の施用が作物の収量水準を維持し、窒素の施肥効果を高めることにつながると考えられる。

謝 辞 本研究の一部は、滋賀県職員大学派遣研修の一環として行ったものであり、土壤微生物の計数法について、京都大学農学部の高橋英一名誉教授、小林達治前助教授からご指導とご助言を頂いた。

また、微生物バイオマスの定量には、三重大学生物資源学部の梅林正直教授、犬伏和之助教授（現千葉大学園芸学部）からご指導と分析機器等について多々便宜を図って頂いた。

当场環境部の大橋恭一博士には、調査にご協力頂いた。辻 藤吾博士、長谷川清善博士には本稿のご校閲と有益なご助言を頂いた。

ここに記して、以上の方々に感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 長谷川清善・小林正幸・勝木依正・中田 均：水田における有機物施用が水質に及ぼす影響（第1報）牛糞、稲わら連用水田における年間の水質変化。滋賀農試研報 22,91-98,1980.
- 2) ———・—————・中村 稔：水田における有機物施用が水質に及ぼす影響（第3報）オガクズ牛糞堆肥、稲わら連用と畑転換の影響・ライシメータ試験。滋賀農試研報 26,20-33,1985.
- 3) ———：水田における窒素の動態と環境への影響評価に関する研究。滋賀農試特別研報 17,1-164, 1992.
- 4) INUBUSHI, K. and WATANABE, I: Dynamics of Available Nitrogen in Paddy Soils II. Mineralized N of Chloroform-Fumigated Soil as a Nutrient Source for Rice. Soil Sci. Plant Nutr.,32,561-577,1986.
- 5) 石橋 豊・田辺邦美・内藤利貞・林弘宣：農業水利演習 I. 農業水分, 178-194, コロナ社, 1970.
- 6) 甲斐秀昭・河口定生・丸本卓哉：D-アミノ酸の土壌分布とその土壌窒素代謝における意義。土と微生物 18,27-41,1976.
- 7) 金田吉弘・関矢信一郎・米山忠克・長野間宏・木方展治：水田土壌における¹⁵N標識肥料の有機態画分およびバイオマス窒素への分布。土肥誌 63, 455-458,1992.
- 8) 川村戈十二・中田 均・重田和男：水田における有機物施用に関する研究（第1報）稲わらの土壌中における分解過程と腐植物質の生成について。滋賀農試研報 14,56-61,1972.
- 9) 國松孝男：農耕地からのN, P 負荷（その1）。環境技術 14,114-119,1985.
- 10) ———・羅 榮・須戸 幹・武田育郎：非作付期間の田からの水質汚濁物質の表面流出。農土論集 170,45-54,1994.
- 11) 前田乾一・鬼鞍 豊：圃場条件における有機物の分解率の測定法。土肥誌 48,567-568,1977.
- 12) 中田 均・川村戈十二・澤 重孝：農耕地における肥料成分の行動に関する研究（第1報）水田ライシメータにおける肥料成分の行動と収支。滋賀農試研報 18,60-90,1976.
- 13) 西尾 隆：農地土壌における窒素の形態変化。平成3年度農業工学課題別研究会。物質循環と農地, 16-19,1992.
- 14) 農林省中国農業試験場・中国地域技術連絡会議事務局：水田における稲、麦わらの施用法に関する研究。中国地域共同研究成果収録 5,1970.
- 15) 小川吉雄・酒井 一：水田における窒素浄化機能の解明。土肥誌 56,1-9,1985.
- 16) 尾崎保夫：農耕地における肥料成分の動態と制御 (1). 農業および園芸 68,539-543,1993.
- 17) 芝野和夫・大野芳和：露地野菜畑における窒素の溶脱 -降雨の影響と溶脱の予測- 野菜・茶試研報A2,201-208,1988.
- 18) 柴原藤善・長谷川清善・小林正幸：2 段式暗渠利用による水田排水の水質浄化。滋賀農試研報 33, 30-62,1992.
- 19) ———・—————・—————・小林達治・高橋英一：稲わら施用による施設土壌の硝酸塩除去と微生物相の変化。滋賀農試研報 31,1-13,1990.
- 20) ———・犬伏和之・長谷川清善・山室成一：¹⁵Nトレーサー法による稲わらおよび牛糞堆肥連用水田の窒素動態解析（第2報）窒素動態と微生物バイオマスの関係。土肥要旨集 40,118,1994.
- 21) ———・辻 藤吾・上野二郎・寺本 薫：深耕、石灰窒素利用による水稻跡小麦の施肥効率向上と子実蛋白の向上技術。平成5年度近畿中国農業研究成果情報,1994.
- 22) 志賀——・大山信雄・前田乾一・鈴木正昭：各種有機物の水田土壌中における分解過程と分解特性に基づく評価。農研センター研報 5,1-19,1985.
- 23) 滋賀県農業試験場他：琵琶湖-淀川水系における農業排水の水質改善に関する研究。総合助成中核研究成果 84-003-08,1-129,1985.
- 24) 新編土壌微生物実験法。土壌微生物研究会編,173-190 p. 養賢堂, 東京, 1992.
- 25) 塩田悠賀里・加藤 保・岩田久史・有澤道雄：水田輪換方式と土壌管理技術に関する研究（第4報）転換期間及び作付体系が土壌微生物に及ぼす影響。愛知農総試研報 18,89-96,1986.
- 26) 田淵俊雄・鈴木誠治・高村義親：非作付期の谷津田における畑地流出水中のNO₃-Nの除去について。農土論集 104, 9-15, 1983.
- 27) 武田育郎・國松孝男・小林慎太郎・丸山利輔：水田群からの汚濁負荷流出に関する研究（Ⅱ）水系に

- おける水田群の汚濁物質の収支と流出負荷量. 農土
論集 153,63-72,1991.
- 28) 辻 藤吾・柴原藤善・大橋恭一・河合敏彦・田中
靖志: 輪換畑における土壌類型別暗渠排水法と水質
保全効果. 土肥誌 65,199-205,1994.
- 29) 脇本賢三・梶本晶子・伊藤 信: 転換畑における
ダイズ・コムギ安定栽培のための施肥法. 農業およ
び園芸 62,1171-1176,1987.
- 30) 吉野 喬・出井嘉光: 土壌窒素供給力の有効積算
温度による推定法について. 農事試研報 25,1-62,
1977.

Summary

With extension of the drainage practice and the rotation of paddy by other crops, the control of discharge of nitrate nitrogen from paddy fields has been required in order to prevent the pollution of lake and underground water. Therefore the influences of plowing and straw incorporation in the paddy field on the generated load of eutrophic materials was investigated by using lysimeters for four years. Furthermore, the effect of rice straw incorporation in fallow paddy fields was investigated with reference to changes of soil microbial flora and easily decomposable organic nitrogen.

The results obtained are summarized as follows ;

1) The generated load of nitrogen which was calculated by subtracting N in the irrigation water from the surface and percolating discharge was affected by cropping periods, the plowing and treatment ways of plant residue, ranging 15~195, -13~37, 151~246 and 5~27gN/ha/day including three times of fallow periods of rice, two times of rice cropping periods, a wheat cropping period and a soybean cropping period, respectively.

On the other hand, the generated load of chemical oxygen demand (COD) and phosphorus (P) increased in rice cropping periods, whereas treatment ways of plant residue had less effects on the generated load of COD, phosphorus and potassium (K). The percentages of discharge to the amounts of fertilizer application in the whole period ranged 24~41% for N, 7~10% for P and 72~104% for K.

2) Although the amount of nitrogen discharge, of which forms were almost nitrate nitrogen under upland conditions, increased by plowing in fallow periods of rice, on an average 35% of nitrogen discharge were suppressed by rice straw incorporation for three years experiment. However incorporation of rice straw after burning treatment decreased that effect as low as to 22%.

3) The numbers of aerobic bacteria, actinomycete and fungi in fallow paddy soils increased by rice straw incorporation with plowing. However influences of treatment ways on the numbers of nitrifying bacteria, denitrifying bacteria and aerobic cellulose decomposer were not significant.

Continuous incorporation of plant residue increased soil microbial biomass nitrogen and easily decomposable organic nitrogen which is mineralizable under the submerged condition. Nitrogen balance and those increases of organic nitrogen showed that the reduction in the nitrogen discharge was mainly due to enhancement of nitrogen immobilization.

4) The plowing treatment in fallow paddy fields depressed for weeds to thrive and was valid for stable growth and yield of rice. Furthermore rice straw incorporation with plowing increased the yield of crops annually as compared with the plot of no rice straw with plowing.

5) These findings indicate that rice straw incorporation with plowing in Autumn enhances the nitrogen immobilization in fallow period of rice, and contributes to the soil nitrogen fertility, stable growth of crops and reduction in the discharge of nitrate nitrogen from paddy fields.