

研究論文

栽培

不耕起・無代掻き水田で栽培された水稻の乾物生産特性

— 耕起・代掻き水田で栽培された水稻との比較 —

本林隆*・成岡由規子・和田誉・平沢正

(東京農工大学)

要旨：不耕起・無代掻き水田で栽培された水稻と耕起・代掻き水田で栽培された水稻の生育および乾物生産過程を1997年～1999年の3年間にわたり比較し、それらの相違する要因を検討した。3ヶ年とも両水稻の玄米収量、収穫期地上部乾物重には違いはみられなかったが、それぞれの成立過程には相違が認められた。収量構成要素は1997年、1998年では不耕起・無代掻き栽培水稻は m^2 あたり粒数が耕起・代掻き栽培水稻に比べて少ない傾向があったものの、千粒重は大きかった。また、1999年は、不耕起・無代掻き栽培水稻は m^2 あたり粒数がやや多かったにもかかわらず、登熟歩合は高い傾向がみられた。不耕起・無代掻き栽培水稻の地上部乾物重は耕起・代掻き栽培水稻に比べ、生育前期には小さく、個体群成長速度(CGR)も小さい傾向がみられたが、生育後期にはCGRが大きくなったことにより、収穫期の地上部乾物重には相違がなくなった。生育前期に不耕起・無代掻き栽培水稻のCGRが小さいことには、耕起・代掻き栽培水稻に比べ葉面積指数(LAI)が小さいことが関係していた。これに対し、生育後期に不耕起・無代掻き栽培水稻のCGRが大きくなったのはNARが耕起・代掻き栽培水稻に比べて大きいことに起因していた。不耕起・無代掻き水稻は耕起・代掻き栽培水稻に比べ生育後期は葉身の窒素含量が高く維持されることによって個葉の光合成速度が大きく、このことがNARの高い要因であると考えられた。また、不耕起・無代掻き栽培水稻では、生育後期に茎基部における出液速度と根から地上部に送られるサイトカニン活性が高い傾向が認められた。

キーワード：乾物生産、光合成速度、収量、収量構成要素、水稻、窒素濃度、不耕起・無代掻き栽培、葉面積指数。

我が国の水稻栽培では一層の生産コストの低減や省力化が求められている一方、環境負荷の軽減も同時に求められている。このような背景から、不耕起・無代掻きによる水稻栽培が注目されている(早坂ら1989, 金田1992, 長期不耕起栽培圃場研究グループ1994, 長谷川1995)。これまでの研究から、この不耕起・無代掻き栽培では、地耐力の増大により収穫作業が容易になる(金田1992, 1997, 佐藤1992)、透水性の向上によって土壌の酸化状態が維持される(長野間ら1989, 佐藤1992, 金田1992, 1997, 高橋1993)あるいは排水性が向上する(長野間ら1991)、稲わらがすき込まれず、土壌が酸化的であるため土壌からのメタン発生量が低下する(金田ら1992, 石橋1995)、不耕起水田では代掻き時の落水工程がないため水田からの養分流出が軽減される(佐藤1992)、などが指摘されている。さらに、長谷川(1995)は不耕起水田では休閑期の乾土効果が極めて小さいため、乾土効果による水稻生育の年次変動を回避できる可能性を指摘している。

このように不耕起栽培についての様々なメリットが示されている一方で、土壌窒素の無機化量が低下すること(野々山・吉澤1976)、耕起・代掻きによる越年生雑草や多年生雑草の防除ができないため、雑草防除を除草剤に頼る場合には除草剤の使用量が増加する(長谷川1995)などのデメ

リットも指摘されている。しかし、以上のように研究例の多くは不耕起栽培した水田の土壌環境に関するもので、水稻そのものの生育特性あるいは乾物生産特性、収量など作物学的観点からの総合的な検討は十分ではなかった。また、不耕起・無代掻き栽培している水田における病気や害虫の発生およびそれらの防除など作物保護の観点からの研究例も日鷹(1990)によるウンカ類の発生とそれらの天敵のクモ類に関するものを除けば、ほとんどなかった。そこで著者らは1996年より不耕起・無代掻き水田と耕起・代掻き水田のそれぞれで生育した水稻について作物学的観点および作物保護の観点から一連の比較検討を進めてきた。

生育特性に着目すると、不耕起・無代掻き栽培された水稻は、耕起・代掻き栽培された水稻に比べ初期生育は抑制されるものの、生育中・後期は根圏の分布も広がり、活性も高いため秋勝り的な生育を示すことが認められている(金田1992, 安藤ら1998)。しかし、このような不耕起・無代掻き栽培された水稻の生育特性と乾物生産過程との関係や、それにかかわる要因について解析的に検討した報告は少なく、特に、生育後期の乾物生産過程に関しては不明な点が多い。そこで、本研究ではまず不耕起・無代掻き栽培した水稻および耕起・代掻き栽培した水稻の生育・収量特性および乾物生産過程を比較するとともに、収量に大き

な影響を及ぼす登熟期の光合成速度を比較検討した。

材料と方法

1. 供試品種と試験区の設定

水稻品種「月の光」を供試した。1997年～1999年の3ヶ年にわたり東京農工大学農学部附属農場（現在、農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター）の水田に、耕起と代掻きを行わずに湛水、移植した不耕起・無代掻き区および通常の方法で耕起、代掻き後に移植した耕起・代掻き区を設けた。各区を3あるいは4反復で乱塊法により配置し、各反復の面積は約3aであった。

2. 栽培方法

箱育苗した約20日齢の稚苗を、3ヶ年とも5月中旬に耕起・代掻き区は機械植え、不耕起・無代掻き区は手植えで移植を行った。株密度は、 16.7 株 m^{-2} 、株あたり植え付け本数は3本とし、耕起・代掻き区も移植後の間引き、補植により3本に調整した。基肥は移植5～7日前に、化成肥料（燐加安42号（14：14：14）；全農）を用いてN、 P_2O_5 、 K_2O の成分で各 4 g m^{-2} を、不耕起区は表面施肥、代掻き区は全層施肥した。追肥は、出穂前約20日および出穂後約10日に化成肥料（NK化成2号（16：0：16）；全農）をN、 K_2O の成分でそれぞれ 2 g m^{-2} 表面施肥した。3ヶ年とも7月下旬に紋枯病防除を目的にバリダマイシンA液剤（バリダシン液剤；北興化学）1000倍液 0.2 L m^{-2} を散布した。なお水田は栽培期間中常時湛水とした。

3. 生育、乾物生産および収量調査

生育調査は、7日おきに各反復それぞれについて連続する10株を2カ所ずつ選び、草丈、茎数、葉身の緑色程度（SPAD値）を測定した。SPAD値は、グリーンメーター（SPAD502；ミノルタ社製）を用いて主茎の展開完了した最上位の葉より1枚下の葉を測定した。1999年は8月25日、9月21日および10月4日に各調査株の主茎に着生する全葉位のSPAD値を測定した。

乾物重の測定にあたっては、3ヶ年とも、移植後約8～9週の最高分げつ期、出穂期、出穂後約3～4週の登熟中期、収穫期の各生育時期に、1反復あたり2カ所を無作為に選び、それぞれ連続する20株の茎数を数え、平均的な茎数を示す5株を選んで採取した。株毎に葉面積を自動面積計（AAM-7型；林電工社製）で測定した。地上部は、根を切除し、株元を丁寧に水洗した後、 90°C で72時間通風乾燥して、乾物重を測定した。

部分刈り収量は、出穂後約6～7週目に1反復あたり3ヶ所を無作為に選び、それぞれ圃場 1 m^2 を連続して採取し求めた。併せてそれぞれの地点の周辺から平均的な穂数を示す株を乾物重の測定と同様に3株選び、収量構成要素を調査した。なお、精玄米は 1.8 mm 目の篩で選別した。

4. 葉身の窒素含有率

1999年の出穂期（8月16日）、登熟期（9月14日）および収穫期（9月29日）に、各反復より平均的な穂数を示す4株を選び、それぞれの株の主茎に着生する葉身を葉位別に採取し、 90°C で通風乾燥した後、ウイレー型粉碎機（1029-B；吉田製作所製）で粉碎した。窒素含有率（乾物重当たり）はNCアナライザー（NC-80AUTO；住友化学工業製）を用いて測定した。

5. 光合成速度

平均的なSPAD値を示す株の主茎に着生する葉（葉身中央部の長さ34 mmの部分）の光合成速度を携帯光合成測定装置（Li-6200；Li-Cor社製）により測定した。用いた同化箱の容量は 0.25 L （6000-13；Li-Cor社製）で、同化箱内の空気中の CO_2 濃度がほぼ $350\sim370 \mu\text{L L}^{-1}$ の範囲で3回連続して測定し、3回の測定の平均値を求めた。測定には直前まで直射光を受けている葉身を用い、測定中は同化箱に約 $2000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の人工光（Model LA-60Me；林時計工業社製）を照射し、あわせて装置全体をビーチパラソルの下に置き、葉温の著しい上昇を防いだ。

6. 出液速度と木部液の全窒素含量

各反復より平均的な穂数を示す4株を選び、地面から13 cmの位置で茎と葉鞘を切断し、切り口から出てくる木部液を脱脂綿で採取した。木部液の採取は17時30分から翌朝8時30分の15時間とし、切り口につける前と採取後の脱脂綿の重量差を出液量とした。なお、出液採取中は脱脂綿をポリエチレン袋で覆ったので、大気との水分の交換によって生じる脱脂綿の重量変化は極めて小さかった。木部液はケルダールガンニング変法で分解した後、インドフェノール法により全窒素量を定量した。

7. 木部液のサイトカイニン活性

脱脂綿に集めた木部液は 0.1% 酢酸を含む80%エタノールで抽出した。この抽出液を減圧濃縮後、Sep-pak C18カートリッジ（Millipore製）で精製し、*Amaranthus tricolor*を用いた*Amaranthus*生物検定法（Biddington and Thomas 1973）でサイトカイニン濃度を定量し、Soejimaら（1995）にならって出液速度とサイトカイニン濃度の積を木部液のサイトカイニン活性として表した。

結 果

1. 収量および収量構成要素

3ヶ年の部分刈り収量と収量構成要素を第1表に示した。部分刈り収量は、年次による変動はあったものの不耕起・無代掻き区では $488\sim545 \text{ g m}^{-2}$ 、耕起・代掻き区では $480\sim524 \text{ g m}^{-2}$ で、いずれの年も両区の間有意差はなく、傾向も一定ではなかった。しかし、収量構成要素には若干の相違がみられた。すなわち、出穂期までに決まる m^2 当

第1表 不耕起・無代掻き区（不耕起）と耕起・代掻き区（代掻き）の部分刈り収量および収量構成要素.

年	区	m ² 当り穂数	一穂粒数	m ² 当り粒数 ($\times 10^3 \text{ m}^{-2}$)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	収量 (g m^{-2})	部分刈り収量 (g m^{-2})
1997	不耕起	291.1 \pm 6.2	111.4 \pm 2.4	32.4 \pm 0.3	78.0 \pm 0.1	20.5 \pm 0.1	522.1 \pm 10.2	500.7 \pm 6.5
	代掻き	346.9 \pm 7.7	99.7 \pm 1.9	34.6 \pm 1.4	78.6 \pm 0.3	19.7 \pm 0.1	536.2 \pm 26.2	524.5 \pm 48.5
	P<0.05	*	N.S.	N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.
1998	不耕起	237.4 \pm 5.2	105.9 \pm 2.1	25.2 \pm 0.8	89.1 \pm 1.0	22.7 \pm 0.2	507.4 \pm 14.5	545.3 \pm 5.2
	代掻き	246.8 \pm 6.6	113.1 \pm 2.6	27.9 \pm 1.2	85.0 \pm 1.8	21.4 \pm 0.2	509.0 \pm 20.6	516.2 \pm 26.8
	P<0.05	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.
1999	不耕起	248.8 \pm 9.8	112.6 \pm 3.1	28.1 \pm 1.4	84.9 \pm 1.2	22.0 \pm 0.2	529.9 \pm 23.8	488.7 \pm 17.5
	代掻き	223.5 \pm 6.0	119.1 \pm 2.3	26.6 \pm 0.6	83.1 \pm 2.0	22.0 \pm 0.1	492.8 \pm 20.4	480.0 \pm 14.0
	P<0.05	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.

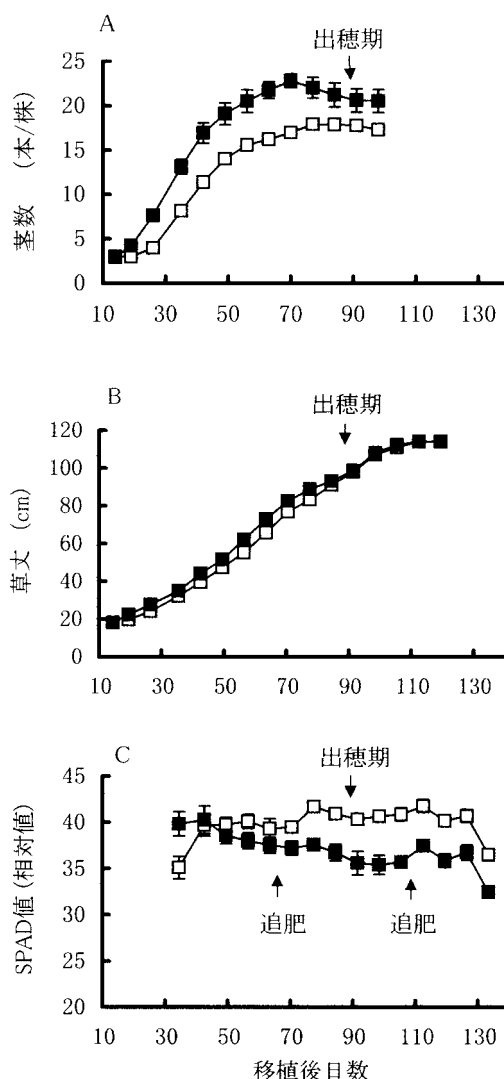
平均値 \pm 標準誤差 (1997 年は $n=3$, 1998 年, 1999 年は $n=4$). 千粒重および部分刈り収量は含水率 14% の値. 登熟歩合は精玄米数を穎花数で割って求めた. * は 5% 水準で有意差があることを示し, N. S. は有意差がないことを示す.

たり穂数および m^2 当たり粒数をみると, 1997 年の m^2 当たり穂数は耕起・代掻き区に比べ不耕起・無代掻き区が有意に少なく, その結果, m^2 当たり粒数は不耕起・無代掻き区が少ない傾向が認められた. 1998 年は不耕起・無代掻き区の m^2 当たり穂数, 1 穂粒数が耕起・代掻き区に比べ少ない傾向があり, その結果, m^2 当たり粒数も, 不耕起・無代掻き区が少ない傾向があった (有意差なし). 1999 年は不耕起・無代掻き区が有意差はみられなかったが m^2 当たり穂数が多く, その結果, m^2 当たり粒数が耕起・代掻き区に比べ逆に多い傾向があった. 一方, 出穂期以降に決定される千粒重や登熟歩合をみると, 1997, 1998 年は耕起・代掻き区に比べ粒数が少ない傾向にあった不耕起・無代掻き区の千粒重が 5% 水準で有意に大きかった. 1999 年は不耕起・無代掻き区は耕起・代掻き区に比較して m^2 当たり粒数がやや多くても, 登熟歩合が高い傾向が認められた.

2. 生育経過

両区の水稲の茎数, 草丈, 葉身 SPAD 値の推移には, 1999 年の生育前期の茎数および SPAD 値を除いて 3 ヶ年ともほぼ同様な傾向が認められたので, 1997 年における結果を第 1 図に示した. 耕起・代掻き区の茎数は, 移植後 70 日目に 24 本/株前後に達したが, その後減少し, 出穂期 (移植後 90 日目) の茎数は 20 本/株で有効茎歩合は 84.2% であった. 一方, 不耕起・無代掻き区の茎数増加は耕起・代掻き区に比べ緩慢で, 移植後 80 日目に 17 本/株に達し, その後はほとんど減少しなかった (第 1 図 A). 草丈は, 移植後 70~80 日目まで不耕起・無代掻き区が耕起・代掻き区に比べ若干低かったが, 幼穂形成期の後期に大きく増加し, 出穂期には違いはなくなった (第 1 図 B).

葉身の SPAD 値は, 生育初期は不耕起・無代掻き区に比べ耕起・代掻き区が高かったが, 移植後 40 日目で両区はほぼ等しくなった. その後, 登熟中期までは耕起・代掻き区は追肥直後に値がわずかに増加したものの, 全体としては生育を追って低下した. これに対して, 不耕起・無代



第1図 不耕起・無代掻き区 (□) および耕起・代掻き区 (■) における水稲の茎数 (A), 草丈 (B), SPAD 値 (C) (1997 年). SPAD 値は展開を完了した最上位葉より 1 枚下の葉における測定値. 矢印は出穂期. 棒線は標準誤差 ($n=3$) を示す. なお, 草丈についても棒線で S.E. を示したが, S.E. が小さかったため, 大部分は記号の中にかくれている.

第2表 不耕起・無代掻き区（不耕起）と耕起・代掻き区（代掻き）の水稻における各生育段階の地上部乾物重.

年	区	地上部乾物重(gm ⁻²)					
		I	II	III	IV		
1997	不耕起	170.9±12.8	811.5± 9.0	1248.0± 32.4	1551.6±108.6		
	代掻き	266.8±25.2	1105.1± 76.2	1497.1± 31.6	1671.7±115.4		
	P<0.05	*	*	*	N.S.		
1998	不耕起	182.3±41.7	845.4±124.0	1052.8±111.1	1385.9±101.1		
	代掻き	415.1±29.0	1021.6± 40.8	1252.3± 40.0	1415.4± 66.4		
	P<0.05	*	*	*	N.S.		
1999	不耕起	194.8±22.0	669.7± 19.7	984.8± 85.9	1122.1± 93.8		
	代掻き	219.6±22.7	701.8± 16.3	1150.3± 45.9	1182.2± 43.8		
	P<0.05	N.S.	N.S.	*	N.S.		

I, II, III, IVはそれぞれ最高分けつ期（移植後8~9週）、出穂期、登熟中期（出穂後3~4週）、収穫期を示す（第3表も同様）。平均値±標準誤差（1997年はn=3, 1998年, 1999年はn=4）。

第3表 不耕起・無代掻き区（不耕起）と耕起・代掻き区（代掻き）の個体群生長速度（CGR）、純同化率（NAR）および平均葉面積指数（LAI）。

年	区	CGR			NAR			LAI		
		I~II	II~III	III~IV	I~II	II~III	III~IV	I~II	II~III	III~IV
1997年	不耕起	15.60	16.24	12.65	5.59	3.91	—	2.79	4.16	—
	代掻き	20.17	12.95	7.28	5.70	2.53	—	3.54	5.12	—
1998年	不耕起	16.58	10.91	12.81	6.52	4.26	—	2.54	2.56	—
	代掻き	15.16	12.15	6.27	4.07	2.83	—	3.72	4.29	—
1999年	不耕起	20.65	10.87	6.24	6.19	2.70	2.56	3.33	4.02	2.44
	代掻き	20.97	15.46	1.45	5.76	3.45	0.47	3.64	4.48	3.11

1997年および1998年の登熟中期~収穫期（III~IV）におけるNAR, LAIが示されていないのは、収穫期の葉面積を測定しなかったため。

掻き区ではほとんど低下が認められず、耕起・代掻き区に比べて高く推移した。登熟中期から収穫期にかけて両区とも急激に低下したが、不耕起・無代掻き区が高く推移した（第1図C）。1999年は6月中旬から下旬の天候が不順で、水稻の生育に遅れがみられた。特に耕起・代掻き区では他の年に比べて茎数が少なかった。また、SPAD値は出穂期まで不耕起・無代掻き区に比較して高く推移したが、登熟中期以後は他の年と同様、不耕起・無代掻き区が高く推移した（図省略）。

3. 乾物重および乾物生産過程

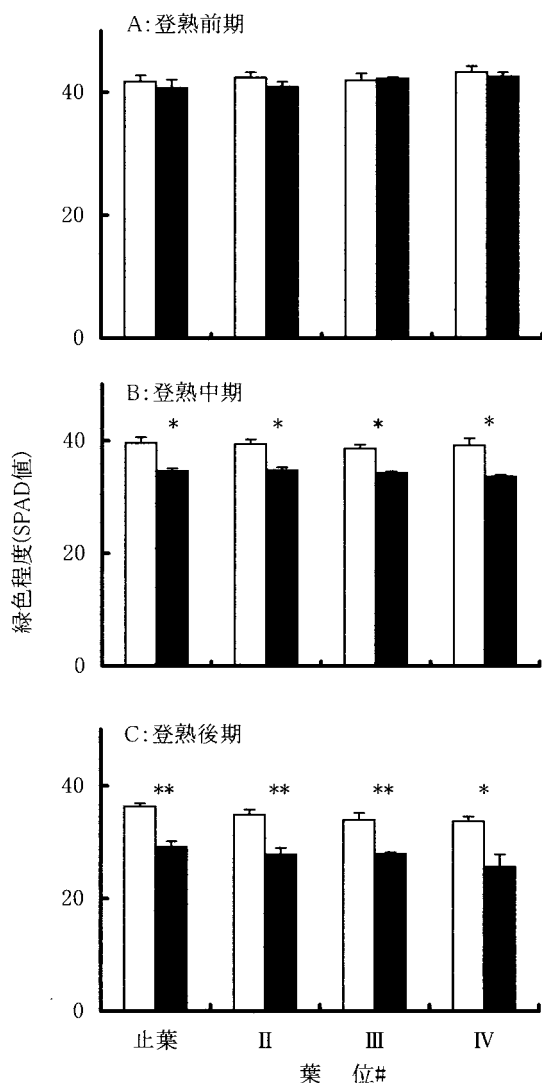
第2表に3ヶ年の各生育段階における地上部乾物重を示した。地上部乾物重はいずれの年も、分けつ期から登熟中期の期間は不耕起・無代掻き区は耕起・代掻き区に比べて小さく、1999年の分けつ期および出穂期を除き、5%水準で有意差が認められた。しかし、収穫期における地上部乾物重は、いずれの年も両区間に違いはみられなかった。

両区のこのような乾物重の相違を成長解析法により解析した。第3表に3ヶ年の各生育段階における個体群生長速度（CGR）、純同化率（NAR）および平均葉面積指数（LAI）をまとめて示した。一部を除いて、3ヶ年ともほぼ同様の傾向を示した。すなわち、CGRは出穂期あるいは登熟中

期までは、不耕起・無代掻き区が耕起・代掻き区に比べて小さい傾向がみられたが、逆に、登熟中期以後は不耕起・無代掻き区が大きくなった。LAIは、登熟中期までは耕起・代掻き区に比べて不耕起・無代掻き区が小さく推移し、NARはLAIの大きかった耕起・代掻き区が、1999年の出穂期から登熟中期の期間を除いて小さかった。これらのことから、登熟中期までのCGRの相違はLAIの相違によって生じていたと考えられる。また、1999年は登熟中期以後、不耕起・無代掻き区は耕起・代掻き区に比べてLAIは小さかったが、NARが大きく、このことによって前者のCGRが大きくなった。1997年および1998年も、登熟中期までLAIが小さかったので、登熟中期以後のCGRの相違は主としてNARの相違に起因していたと考えられる。

4. 葉身のSPAD値と光合成速度

不耕起・無代掻き区のNARが耕起・代掻き区に比較して大きくなった要因の一つとして、LAIが小さいことによる葉身の相互遮蔽の程度が小さいことが考えられる。また、NARは、個体群構造と吸光係数に代表される受光態勢、および個体群を構成する各葉身の光合成速度によって決まる。受光態勢には明確な相違はみられなかった（図省略）、両区の間で登熟期間におけるNARの相違を、個葉

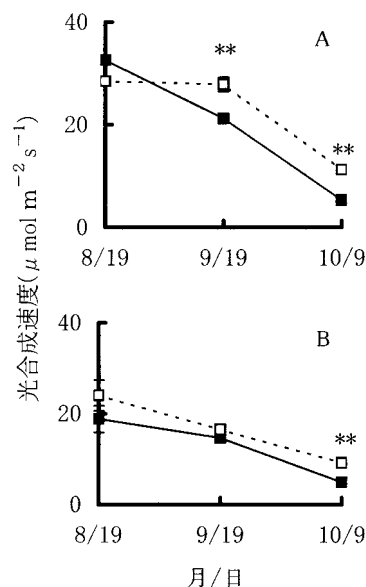


第2図 登熟前期 (A), 中期 (B), 後期 (C) の不耕起・無代掻き区 (□) と耕起・代掻き区 (■) の水稲における葉身緑色程度 (1999 年). 棒線は標準誤差 (n=3) を示す. *, ** は 5% 水準, 1% 水準でそれぞれ有意差があることを示す. # ; 止葉より 1, 2, 3 葉下の葉をそれぞれ II, III, IV とする (第4図も同様).

の光合成速度および葉身のクロロフィル含量や光合成速度と密接な関係のある SPAD 値を 1999 年に葉位に着目して比較した.

登熟前期の 8 月 25 日における SPAD 値には, いずれの葉位も区間に相違がなかった (第2図). しかし, 登熟中期の 9 月 21 日には, 耕起・代掻き区に比べ不耕起・無代掻き区の SPAD 値がいずれの葉位においても有意に高くなり, 登熟後期の 10 月 4 日には両区の差は一層拡大した.

第3図に両区の水稲の止葉および止葉の2枚下の葉 (Ⅲ葉) の光合成速度を示した. 止葉の光合成速度は登熟前期では両区間に違いはなかったが, 登熟中期の 9 月 19 日には耕起・代掻き区が $21.2 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であったのに対し不耕起・無代掻き区では $27.9 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, そして, 登熟後期の 10 月 9 日には, 前者が $5.4 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に



第3図 不耕起・無代掻き区 (□) と耕起・代掻き区 (■) の水稲における止葉 (A), Ⅲ葉 (止葉の2枚下の葉) (B) の光合成速度 (1999 年). 光合成速度は葉身の中央部を CO_2 濃度 $350-370 \mu \text{L L}^{-1}$, 光強度 $2000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (人工光) の条件下で午前中に測定した. 棒線は標準誤差 (n=4) を, ** は 1% 水準で有意差があることを示す.

対し, 後者は $11.3 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と, 不耕起・無代掻き区の方が有意に高かった. Ⅲ葉の光合成速度は, 登熟期全体を通じて不耕起・無代掻き区が高い傾向が認められ, 特に, 登熟後期では耕起・代掻き区に比べて不耕起・無代掻き区が有意に高かった.

5. 窒素含有率

葉身の SPAD 値, 光合成速度と密接な関係にある葉身の窒素含有率は登熟前期は両区間の相違は明らかでなかったが, 登熟中期以後はすべての葉位で不耕起・無代掻き区が高い傾向が認められ, 特に, 登熟後期には止葉を除くすべての葉で不耕起・無代掻き区が有意に高くなった (第4図).

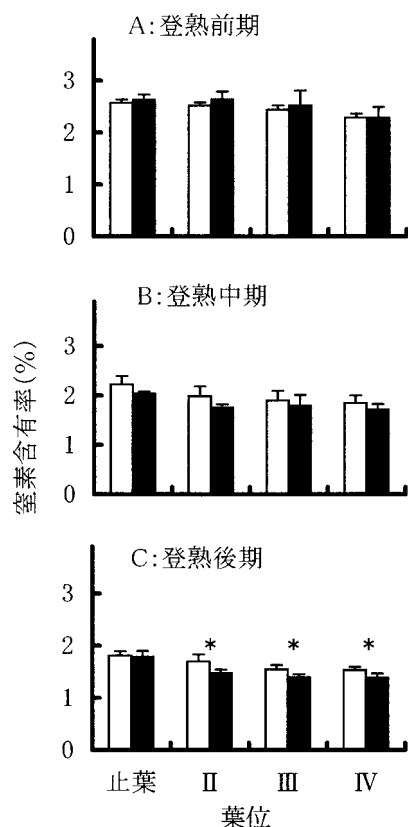
6. 出液速度と木部液の窒素含量

第4表に 1999 年における登熟前期 (8 月 22, 23 日), 中期 (9 月 9, 10 日), 後期 (9 月 29, 30 日) における両区の出液速度および木部液の全窒素濃度と全窒素量を示した. 出液速度は登熟に伴って減少したが, いずれの時期も耕起・代掻き区に比べ不耕起・無代掻き区の方が高い傾向がみられ, 特に登熟後期は耕起・代掻き区が $10.0 \text{ mL (15h)}^{-1}$ であったのに対して不耕起・無代掻き区では $12.7 \text{ mL (15h)}^{-1}$ で有意に高かった. そして, 登熟前期から後期にかけての出液速度の低下率は耕起・代掻き区 (24.2%) に比べて不耕起・無代掻き区 (14.2%) で小さかった. 木部液中の全窒素濃度は両区間に違いはみられなかったもの

第4表 不耕起・無代掻き区（不耕起）と耕起・代掻き区（代掻き）の水稻における株当たり出液速度および木部液の全窒素濃度と全窒素量#（1999年）.

月日	区	出液速度 (mL 15h ⁻¹)	全窒素濃度 (μ g mL ⁻¹)	全窒素量 (μ g 15h ⁻¹)
8月22日～8月23日	不耕起	14.8 \pm 1.2	6.2 \pm 0.2	89.2 \pm 7.3
	代掻き	13.2 \pm 0.2	6.2 \pm 0.1	81.2 \pm 1.9
9月 9日～9月10日	不耕起	14.6 \pm 1.6	6.6 \pm 0.5	95.5 \pm 5.4**
	代掻き	13.0 \pm 1.3	5.8 \pm 0.9	74.7 \pm 5.7
9月29日～9月30日	不耕起	12.7 \pm 0.3**	6.9 \pm 1.0	88.3 \pm 14.1
	代掻き	10.0 \pm 0.6	7.2 \pm 0.7	71.7 \pm 10.2

#；1株当たりの平均値 \pm 標準誤差（n=4）。出液は地表から13cmの位置で茎と葉鞘を切断し、切り口からの出液を夜間採取し、測定に供した。「全窒素量=(出液速度) \times (全窒素濃度)」**は1%水準で有意差があることを示す。



第4図 登熟前期 (A), 中期 (B), 後期 (C) の不耕起・無代掻き区 (□) と耕起・代掻き区 (■) の水稻葉身における窒素含有率 (1999年). 棒線は標準誤差 (n=4) を, *は5%水準で有意差があることを示す.

の、夜間に地上部に送られる全窒素量（出液速度と全窒素濃度の積）はいずれの時期も、耕起・代掻き区に比べて不耕起・無代掻き区の方が多い傾向があり、特に登熟中期には有意差が認められた。

7. 出液中のサイトカニン濃度および活性

最後に、植物体の老化抑制に働くと考えられている出液

中のサイトカニン濃度およびその活性について比較する。8月22, 23日の登熟前期には、濃度、活性とも耕起・代掻き区に比べて不耕起・無代掻き区が低い傾向にあった（第5表）。しかし、9月9, 10日の登熟中期および9月29, 30日の登熟後期のいずれにおいてもサイトカニンの活性は有意ではなかったが、耕起・代掻き区に比べて不耕起・無代掻き区の方が高い傾向がみられた。

考 察

不耕起・無代掻きで栽培された水稻の生育に関しては、耕起・代掻き栽培された水稻と比較して初期生育は劣るが、秋勝り的な生育をされている（金田 1992, 安藤 1998）。しかし、不耕起・無代掻き栽培水稻と耕起・代掻き栽培水稻の乾物生産過程を比較検討した報告は少ない。そこで、本報告は、それぞれの方法で栽培された水稻の生育と、乾物生産の過程および乾物生産に関係するいくつかの生理的要因を比較し、不耕起・無代掻き栽培水稻の乾物生産過程の特徴を3ヶ年にわたって検討した。

生育初期（移植後30日間）の茎数、草丈および葉身のSPAD値は、3ヶ年とも耕起・代掻き区に比べて不耕起・無代掻き区が小さく（第1図）、分けつ期の地上部乾物重も同様に不耕起・無代掻き区が小さかった。この結果は従来の結果（金田 1992, 高橋 1993, 安藤 1998）と一致しており、不耕起水田で栽培された水稻の初期生育は代掻きした水田に栽培された水稻に比べ劣ると言える。その原因については、有機態窒素の無機化量が代掻き土壌に比べ不耕起土壌が少ないこと（金田 1997）、基肥が表層施肥されるため基肥窒素の利用効率が低いこと（金田 1992, 高橋 1993）などによる窒素吸収量の低下が指摘されている。一方、安藤（1998）は、不耕起・無代掻き土壌では土壌硬度の影響を受けて生育初期の水稻根の伸長が抑制され、結果として窒素の吸収量が低下することを示唆している。1999年に移植後30日における両区の水稻の根量を調査した結果、不耕起・無代掻き区の水稻は耕起・代掻き区に比べて少ない傾向が認められた（図省略）。

第5表 不耕起・無代掻き区（不耕起）と耕起・代掻き区（代掻き）の水稻における出液中のサイトカニン活性#（1999年）.

月日	区	出液量 (mL15h ⁻¹)	濃度(nM) (nM BA eq.L ⁻¹)	サイトカニン活性 (pM BA eq.15h ⁻¹)
8月22日－8月23日	不耕起	14.8±1.2	27.4±5.4	407.1± 80.7
	代掻き	13.2±0.2	33.0±2.9	435.5± 38.7
9月 9日－9月10日	不耕起	14.6±1.6	22.1±3.5	347.7± 55.7
	代掻き	13.0±1.3	20.6±4.4	280.1± 60.1
9月29日－9月30日	不耕起	12.7±0.3**	55.1±9.6	654.6±121.2
	代掻き	10.0±0.6	55.9±8.0	591.2± 85.0

#；1株当たりの平均値±標準誤差（n=4）. サイトカニン活性（pM BA eq. 15h⁻¹）=出液速度×サイトカニン濃度**は1%水準で有意差があることを示す.

移植30日以降は、不耕起・無代掻き区の水稲は茎数、草丈の増加速度が大きくなり（第1図）、SPAD値は、1997年および1998年では移植後50～60日以降、また、1999年では登熟中期以降、不耕起・無代掻き区が耕起・代掻き区より高く推移し、前者は後者に比較して秋勝り的な生育を示した。このような秋勝り的な特徴は収量構成要素と乾物生産においても認められた。

収量は、3ヶ年とも耕起・代掻き区および不耕起・無代掻き区の間に有意な違いはみられなかった（第1表）。しかし、収量構成要素をみると、1997年および1998年は、不耕起・無代掻き区の水稲は耕起・代掻き区に比較して、m²当たり粗数は若干少なかったが、千粒重は有意に大きくなった。また、1999年は、不耕起・無代掻き区はm²当たり粗数が耕起・代掻き区よりもやや多かったにもかかわらず、登熟歩合はやや高かった。すなわち、不耕起・無代掻き栽培された水稲は耕起・代掻き栽培された水稲に比べ、生育後期に決定される収量構成要素が大きくなる傾向がみられた。このような生育の相違は、金田（1992）、安藤ら（1998）も認めている。

不耕起・無代掻き区および耕起・代掻き区の乾物生産量を比較したところ、不耕起・無代掻き区は登熟前期あるいは中期までは耕起・代掻き区に比べてCGRが小さく、地上部乾物重は小さく推移したが（第2表）、その後は不耕起・無代掻き区は耕起・代掻き区に比べてCGRが大きくなり（第3表）、その結果、収穫期には両区の地上部乾物重はほぼ等しくなった。成長解析の結果、不耕起・無代掻き区の水稲は耕起・代掻き区の水稲に比較して、登熟前期あるいは中期以前のCGRが小さかったのは、LAIが小さいことによっており、登熟中期以後のCGRが大きくなったのは、NARが大きくなることに起因していることが明らかとなった（第3表）。すなわち、不耕起・無代掻き区の水稲の秋勝り的な特徴はNARが関係していることがわかった。不耕起・無代掻き区の水稲のSPAD値と個葉光合成速度は、耕起・代掻き区に比べて登熟中期～収穫期にいずれの葉位においても高かった（第2、3図）。このことから不耕起・

無代掻き区の水稲のNARが高くなった要因の一つとして、個葉の老化過程における光合成速度が高く維持されたことが考えられた。

葉身の窒素含有率は、登熟中期から後期にほとんどすべての葉位で不耕起・無代掻き区が耕起・代掻き区に比べて高かった（第4図）。葉身の窒素含有率と光合成速度の間には高い正の相関関係があるので（石原ら 1979）、不耕起・無代掻き区の水稲は登熟期間中、耕起・代掻き区の水稲に比べて、葉身の窒素含有率が高く維持されることにより、光合成速度も高く保たれていたと考えられた。

不耕起・無代掻き区の水稲は耕起・代掻き区の水稲に比較して登熟期間中の出液速度が大きく、また、この期間における出液速度の低下程度も小さい傾向が認められ（第4表）、このことから前者は後者に比較して根の生理的活性が高く維持されていることが推察された。このように根の生理的活性が高い不耕起・無代掻き区の水稲では根部液中の全窒素量が高い傾向があったことから（第4表）、不耕起・無代掻き区の水稲は登熟期の窒素吸収量が多いことが推察され、このことによって登熟中期から収穫期の間の葉身の窒素含有率が高く維持されたと考えられた。さらに、根の生理的活性の高かった不耕起・無代掻き区の水稲は根部液中のサイトカニン活性も高い傾向があり（第5表）、このことも窒素吸収とあわせて老化過程の光合成速度の維持に関与している可能性がある（Soejimaら 1995、大川ら 1999、Ookawaら 2003）。

生育後期において不耕起・無代掻き栽培水稲が耕起・代掻き栽培水稲に比較して根の生理的活性や窒素吸収量を高く維持していることについては、不耕起・無代掻き栽培水稲の根の活性が高いこと（人見 1976、野々山 1981、金田 1992）、あるいは表層の根量が不耕起・無代掻き栽培水稲の方が多量なこと（金田 1992、安藤ら 1998）などの要因が考えられる。窒素吸収量が多くなると出液速度が増加し、根部液中のサイトカニン活性が高まることも報告されている（大川ら 1999）。本報告では、不耕起・無代掻き区と耕起・代掻き区の水稲の出液量における相違が根量の違い

によるものか、あるいは、単位根量当たりの窒素吸収量（窒素吸収活性）の違いによるものかは検討できなかった。一方、不耕起・無代掻き水田では土壌窒素の無機化パターンが耕起・代掻き水田と異なるとされており（野々山 1981, 高橋 1993, 金田ら 1994, 1997）、このような土壌からの窒素供給量の相違も水稻の窒素吸収量に影響を与えている可能性も考えられる。今後は、根量あるいは窒素吸収活性についての検討や、不耕起・無代掻き土壌の窒素無機化量についても併せて検討する必要がある。

以上のように、不耕起・無代掻き栽培した水稻と耕起・代掻き栽培した水稻の玄米収量はほぼ等しかったが、生育や乾物生産特性が両水稻の間で異なることが示された。このような不耕起・無代掻き栽培水稻の特徴をふまえ、初期生育を促進させる施肥法（金田ら 1994）など、栽培法を改善すれば、収量をさらに向上させる可能性がある。しかし、緒言で述べたように、不耕起・無代掻き栽培の特徴の一つは省力・省エネルギーにある。また、不耕起・無代掻き栽培に関してはすでに、メタン発生量の減少（金田ら 1992, 石橋 1995）、代掻き時の落水に伴う水田からの養分の流出の軽減（佐藤 1992）、など環境保全的なメリットが指摘されている。さらに、これまでの研究から耕起・代掻きによる土壌表面の攪乱が少なくなることによる天敵生物の密度の増加（本林ら 1999）、あるいは病害発生の抑制などの現象が確認されており、薬剤使用量の低下を通じた環境負荷軽減の可能性が考えられ、環境保全の観点からも大きな意味をもつ栽培方法である。そこで今後はこの点について、不耕起・無代掻き栽培の生態系に及ぼす影響に着目して検討を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、本学名誉教授石原邦先生、塩谷哲夫先生、千葉県農業試験場水田作研究室深山政治氏、小山豊氏、在原克之氏には貴重なご意見をいただいた。また、窒素とサイトカイニン活性の測定にあたっては本学農学部助教授松村昭治氏、大川泰一郎氏にご教示いただいた。水稻の栽培管理にあたって本学 FS センター技術職員相田政昭氏、高橋史寿氏に全面的にお世話になった。ここに記して深く感謝いたします。

引用文献

- 安藤豊・小南力・藤井弘志・岡田佳菜子 1998. 不耕起移植水稻の初期生育と登熟期の特徴について. 土肥誌 69: 618—625.
- Biddington, N.L. and T.H. Thomas 1973. A modified *Amaranthus betaryanin* bioassay for the rapid determination of cytokinins in plant extracts. *Planta* 111: 183—186.
- 長期不耕起栽培圃場研究グループ 1994. 長期不耕起直播田の土壌及び水稻栽培の実態調査. 農業技術 49: 251—256.
- 長谷川浩 1995. 不耕起栽培. 日本作物学会北陸支部・北陸育種談話会編, コシヒカリ. 農文協, 東京. 448—454.
- 早坂剛・上林儀徳・長谷川政俊 1989. 水稻の不耕起機械移植栽培. 日作東北支部報 32: 8—11.

- 日鷹一雅 1990. 粗放的でも集約的でもない農法を求めて. 中筋房夫編, 自然・有機農法と害虫. 冬樹社, 東京. 248—253.
- 人見進 1976. 水稻の不耕起直播栽培の確立に関する基礎的研究. 岡山県農業試験場臨時研究報告 68: 1—50.
- 石原邦・黒田栄喜・石井龍一・小倉忠治 1979. 水稻葉身の窒素含量と光合成速度との関係—同化箱法と酸素電極法を用いての比較—. 日作紀 48: 551—556.
- 石橋英二 1995. 不耕起栽培における土壌環境の変化と圃場管理. 日本土壤肥料学会講演要旨集 41: 234—235.
- 金田吉弘 1992. 低湿重粘土汎用水田における水稻の不耕起及び部分耕移植栽培. 農業技術 47: 215—219.
- 金田吉弘・栗崎弘利・山谷正治 1992. 低湿重粘土水田における汎用化のための下層土の管理. 東北農業研究 45: 77—78.
- 金田吉弘・栗崎弘利・村井隆 1994. 肥効調節型肥料を用いた育苗箱全量施肥による水稻不耕起移植栽培. 土肥誌 65: 385—391.
- 金田吉弘 1997. 多様な水稻栽培方式における水田土壌肥料研究の現状と方向 3. 不耕起栽培における土壌・施肥管理. 土肥誌 68: 69—74.
- 本林隆・和田誉・日鷹一雅 1999. 不耕起水稻栽培の害虫個体群抑制. 日本応用動物昆虫学会第 43 回大会講演要旨 19.
- 長野間宏・金田吉弘・児玉徹 1989. 低湿重粘土水田における汎用化のための下層土の管理 第一報 部分耕移植栽培による土壌の変化と水稻生育の特徴. 東北農業研究 42: 85—86.
- 野々山芳夫・吉澤孝之 1976. 水稻の不耕起直播栽培に関する土壌肥料学的研究（第 4 報）—土壌窒素の発現様式の特徴—. 中国農業試験場報告 E 11: 7—52.
- 野々山芳夫 1981. 水稻の直播栽培に関する土壌肥料学的研究. 中国農業試験場報告 E 18: 1—62.
- 大川泰一郎・菅純子・山崎武仁・柳原里子・平沢正 1999. 登熟期における水稻葉身の窒素含量と光合成速度, リプロース 1,5—ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシナーゼ含量の関係および根から地上部に送られるサイトカイニン—日本晴とアケノホシの比較—. 日作紀 68 (別 2): 76—77.
- Ookawa, T., Y. Naruoka, T. Yamazaki, J. Suga and T. Hirasawa 2003. A comparison of the accumulation and partitioning of nitrogen in plants between two rice cultivars, Akenohoshi and Nipponbare, at the ripening stage. *Plant Prod. Sci.* 6: 172—178.
- 佐藤照男 1992. 不耕起栽培による低湿重粘土水田の土地改良と汎用化の展望. 農業土木学会誌 60: 723—728.
- Soejima, H., T. Sugiyama and K. Ishihara 1995. Changes in the chlorophyll contents of leaves and in levels of cytokinins in root exudates during ripening of rice cultivars Nipponbare and Akenohoshi. *Plant Cell Physiol.* 36: 1105—1114.
- 高橋能彦 1993. 水稻不耕起移植栽培におけるペースト側条施肥の肥料利用率と稲体の窒素吸収特性. 土肥誌 64: 681—684.

Characteristics of Dry Matter Production in Rice Plants Cultivated in Non-Tillage and Non-Paddling Field – Comparisons with Conventional Cultivation : Takashi MOTOBAYASHI*, Yukiko NARUOKA, Homare WADA and Tadashi HIRASAWA (*Fac. of Agriculture, Tokyo Univ. of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183–8509, Japan*)

Abstract : Dry matter production and related characteristics of rice plants cultivated in non-tillage and non-paddling paddy fields (non-tillage plants) were compared with those cultivated in conventionally tilled paddy fields (tillage plants) from 1997 to 1999. The grain yield was not significantly different between the two cultivation methods. However, the yield components were slightly different. In 1997 and 1998 non-tillage plants had fewer spiklets per m² but larger thousand grain weight than conventional tillage plants. In 1999, both the number of spiklets per m² and the percentage of ripened grain tended to be greater in non-tillage plants. The weight of dry matter was lighter in non-tillage plants than in conventional tillage plants until the early ripening stage. This resulted from a lower leaf area index (LAI) in non-tillage plants during this phase of plant growth. In contrast, during the later ripening period, crop growth rate (CGR) was greater in non-tillage plants due to greater net assimilation rate (NAR). As a result, there was no difference in the weight of dry matter between the tillage plants and non-tillage plants. The difference in the NAR may be attributed to the difference in photosynthetic rates during ripening. The higher photosynthetic rate in non-tillage plants was due to the maintenance of high nitrogen levels in leaves.

Key words : Dry matter production, Grain yield, Leaf area index, Nitrogen concentration, Non-Tillage cultivation, Photosynthetic rate, Rice plant, Yield components.
