

水稲作3方式間における人為的二氧化碳発生量の比較

今野 均¹・坂井直樹^{2*}・米川和範¹・林 久喜²

¹ 筑波大学農林技術センター, 305-8577 つくば市天王台1-1-1

² 筑波大学農林学系, 305-8572 つくば市天王台1-1-1

要 旨

地球温暖化の原因物質として温室効果ガスの環境への深刻な問題が提起され、農業も二酸化炭素の発生源として指摘されていることから本研究では、湛水直播区 (CD)、簡易耕起移植区 (MT)、慣行移植区 (CT, 対照) の水稲作3方式を対象に、人為的原因による二酸化炭素発生量の違いを調べた。全工程の作業時間はDS区がCT区の45%、MT区が99%であった。この中から本圃作業のみを取出すと、MT区はCT区の85%であった。全工程の燃料消費量はDS区がCT区の57%、MT区が93%であった。全工程の二酸化炭素発生量はDS区がCT区の96%、MT区が73%であった。二酸化炭素発生量を作業工程別にみると、土壌消毒や籾乾燥などで大きかった。作物の単位乾物収量当たりの二酸化炭素発生量はDS区がCT区の64%、MT区が81%であった。水稲のT/R比を4.0と仮定すると、全乾物量当たりの二酸化炭素発生量はDS区がCT区の64%、MT区が88%であった。以上より、二酸化炭素発生量としてはCT区>MT区>DS区の順であったことから、この点に関する湛水直播の優位性が確認された。

キーワード：簡易耕起、慣行移植、地球温暖化、水稲、直播、二酸化炭素

緒 言

1997年に京都で開催された地球温暖化防止会議 (COP3) において、2015年までに温室効果ガスを6%削減 (1990年対比、炭素換算) することに合意したわが国は、排出権取引以外に、削減の主要部分を森林や農耕地の二酸化炭素固定機能に期待している。このことの重要さは米国では以前から認識されており、土壌固定炭素量の増加を積極的に図る手段として保全耕うん法の有効性が指摘されている (Allmarasら1999)。

一方、農業は二酸化炭素を含めたさまざまな温室効果ガスの発生源でもあり、他部門と同様に削減が求められている。削減を、例えば効果の確実な栽培方式の提案というような具体的な形で進める場合、農業由来の人為的二氧化碳発生量を正確に把握する必要があるが、関係する基礎データは必ずしも十分用意されているとはいえない。

Gajasen (1995) は、タイ国における水稲作 (移植と直播) を対象に、二酸化炭素発生量と関係する投入エネルギーについて分析している。また、水稲作を直接の対象としたものではな

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

いが、Borinら(1997)は畑作の耕うん方式の違いによる投入エネルギーと二酸化炭素発生量について比較している。農水省でも、LCA(Life Cycle Assessment)のためのインベントリーデータの収集が部分的に進みつつあると聞く(私信)。このような状況の中で、農水省による農業由来の人為的二酸化炭素発生を中心にみた8年間にわたる一連の調査報告書は、わが国の現状をある程度具体的に反映しているものといえる(坂井2002)。

著者らは、これまで水稲作における簡易耕起移植を、不耕起と慣行移植という両者の中間に当たる新たな栽培方式と位置づけて、さまざまな角度からその可能性について追求してきた(坂井1998, Hayashiら2000, 林ら2002a, 林ら2002b, 米川ら2002)。

本稿では、二酸化炭素発生に関係する基礎データを充実させるため、水稲作の湛水直播、慣行移植、簡易耕起移植の3方式を対象として測定を行った。ここでは作業性や収量性ととともに、燃料・電力由来のエネルギー量や肥料・農薬由来の二酸化炭素量を求め、上記3方式がもつ削減効果を比較しようとした。

材料および方法

1. 圃場：一連の測定を、1998年4月～10月に筑波大学農林技術センター内の黒ボク土水田で実施した。隣接する水田3枚を供試し、それぞれ湛水直播区(面積20.0a, DS区と略称)、簡易耕起移植区(面積24.4a, MT区と略称)、慣行移植区(面積23.3a, CT区と略称)とした。作業工程を表3～5に示す。DS区では1998年度から、MT区では1995年度から、CT区では1996年度から同一の処理を施してきた。品種にはいずれもコシヒカリを供試した。

2. 測定項目

(1) 移植精度：MT区とCT区では、移植時に10箇所ずつ(1箇所は2地点×5条×100個体からなる)を選んで、欠株率などの移植精度を5月13日に調査した。

(2) 成熟期特性および収量構成要素：水稲収穫時に実施した収量構成要素調査では、5斜線法による代表株法で採取した各20個体を供試して、稈長、穂長、穂数、穂重、 m^2 当たり株数・株当たり穂数、 m^2 当たり穂数、1穂穎花数・登熟歩合・千粒重・収量を求めた。別途実施した坪刈調査では、縦1.5m×横4畦(株間15cm×畦間30cm)の調査区を圃場内に5箇所設定し、精初重と初穂比を求めた。

(3) 作業時間：作業工程ごとに求めた。

(4) エネルギー消費量：燃料消費量は、作業後に当該農業機械の、燃料タンクに作業開始前のレベルまで補充した量によって作業ごとの燃料消費量を求めた。屋内作業のうち電力を使用するものについては、電力計で消費量を求めた。

(5) 投入資材の二酸化炭素発生量：作業で使用した肥料や農薬、ビニールなど資材の種類と量を記録し、それぞれ発生原単位から二酸化炭素発生量を求めた。二酸化炭素発生量原単位(CO_2kg/kg)は軽油=3.20, 灯油=3.17, ガソリン(25:1混合油を含む)=3.10, 潤滑油=3.22とした(坂井1995)。電力については、比較的最新の値として0.30 CO_2kg/kWh を使用した(東京電力2000)。

肥料や農薬については、成分に炭素を含有しているものだけに着目し、炭素含有率・有効成分含量・施用量などから二酸化炭素発生量(潜在量)を求めた。肥料や農薬は、いずれも含有炭素が最終的にすべて二酸化炭素になること、およびその反応速度や限界などについては考慮

しないと仮定した。人間の代謝由来の二酸化炭素については、量的に少ないことから除外した。間接投入エネルギーについても、計算精度の点などから除外した。

結果および考察

本試験の各作業工程で使用した作業機の出力規格を表1に示す。

移植時における調査結果を表2に示す。損傷苗率と損傷株率はともにMT区>CT区であったが、その他の項目については大差がなかった。欠株率については、MT区で4.7%、CT区で3.2%であり、両者に有意差は認められなかった。

作業工程、使用機械、使用資材、作業時間、燃料消費量、電力消費量の測定結果を表3～5に示す。合計作業時間 (s/10a) は、DS区がCT区の45%、MT区が99%であった。既報告(坂井ら1998)では、CT区と比較してMT区で約25%の合計作業時間の減少を得ていたが、今回の結果では両者に大差がなかった。これは、既報告では圃場や播種の準備から収穫までの本圃作業のみを対象にしていたのに対して、今回の結果では本圃外の育苗や乾燥などのきわめて長時間を必要とする作業を含んでいたためこれら本圃外作業の影響で両者の差が消失したと考えられた。この点を確認する意味で、今回の結果から代かき～耕うん間の本圃作業だけを取り出すと、MT区はCT区の86%となった。

全工程における合計燃料消費量 (mL/10a) については、DS区がCT区の57%、MT区が93%であった。電力消費量 (kWh/10a) については、DS区がCT区の101%、MT区が103%であり、3方式間に大差はみられなかった。

発生源別にまとめた二酸化炭素発生量を表6に示す。各区ともに燃料由来が53～66%を占

表1 各作業に使用した作業機の規格

耕耘・施肥作業	育苗作業	移植・播種作業	防除作業	収穫作業
トラクター 23ps, 2500rpm	土壌消毒機 100v, 100w	移植機 (乗5条) 6.2ps, 1800rpm	動力散粉機 2.5ps, 7400rpm	バインダー 2.3ps, 1600rpm
トラクター 30ps, 2800rpm	土壌混合機 100v, 200w	移植機 (歩2条) 2.3ps, 1800rpm	動力噴霧器 1.3ps, 700rpm	ハーベスター 7.0ps, 2400rpm
トラクター 45.5ps, 2250rpm	種子粉衣機 100v, 100w	直播機 (乗6条) 7.2ps, 1800rpm		コンバイン 17.0ps, 2900rpm
	自動播種機 100v, 25w			乾燥機 200v, 1.52kw
	出芽器 100v, 850w			糊摺機 200v, 1.9kw
	温風器 200v, 3.1kw			選別計量器 100v, 400w

表2 MT区とCT区における苗の移植精度

区	植付本数 (本/株)	浮き苗数 (本/株)	転び苗数 (本/株)	損傷苗数 (本/株)	損傷苗率 (%)	損傷株率 (%)	欠株率 (%)
MT区	4.0	1.6	2.0	0.7	17.9	30.1	4.7
CT区	3.8	1.2	1.8	0.3	9.3	19.3	3.2

注) 損傷苗率=浮き苗数+転び苗数, 損傷株率=損傷苗がある株の比率, 欠株率=欠株の比率

表3 DS区における作業工程と作業測定結果

月日	作業工程	使用機械類	使用資材類など	作業時間 s/10a	燃料消費量 mL/10a	電力消費量 kWh/10a
04/12	塩水選/種子消毒		比重1.13/チラウム・チオファネート水和剤100g			
04/27	代かき	ドライバハロー (軽油)		4089	3020	
04/28	種子コーティング	コーティング機	種子6.5kg, カルバー粉粒剤13kg	2110		0.087
05/01	播種	6条兼用直播機 (ガソリン)	披覆種子11.6kg, コシ専肥料58.3kg	2357	788	
05/01	除草剤散布	手動散粒機	ピラゾレート粒剤 3 kg	300		
05/01	防鳥網設置					
05/27	防鳥網撤去					
05/29	殺虫剤散布	手動散粒機	MPP 粒剤 3 kg	490		
06/04	除草剤散布	手動散粒機	プレチラクロール・ベンスルフロンメチル粒剤 3kg	516		
06/04	追肥	動力散布機 (混合ガソリン)	NK-C6化成11.6kg	259	53	
06/23	殺虫剤散布	動力散布機 (混合ガソリン)	MPP 粒剤 3 kg	96	35	
06/29	殺菌剤散布	手動散粒機	プロバネゾール粒剤 3 kg	429		
07/27	追肥	動力散布機 (混合ガソリン)	NK-C6化成11.6kg	219	65	
08/18	殺菌殺虫剤散布	動力散布機 (混合ガソリン)	MPP・フサライド・ベンシクロン・EPP 各剤 3kg	316	90	
10/03	収穫	バインダー (ガソリン)		205	52	
		脱穀機 (軽油)		503	105	
		自脱コンバイン (軽油)		4254	2735	
10/03	運搬	運搬車 (ガソリン)	走行距離2409m		325	
10/03	乾燥	張込み	温度46℃	8718	7270	32.000
		乾燥機 (灯油)		15949		60.000
10/05	初搾り・調製	乾燥機初搾機グレーダー		(小計) 3261		5.000 14.500 0.275
11/27	土壌改良剤散布	ブロードキャスター (軽油)	珪酸カルシウム100kg 珪リン40kg	206 160	95 60	
12/09	耕うん	ロータリー (軽油)		3135	3095	
合 計				47572	17788	111.862

注1) 面積20.0aにおける測定値を10a当りに換算した。

2) 塩水選, 種子消毒, 用土 pH調整, 緑化・硬化, 防鳥網設置・撤去の時間は含まない (表2~4共通)。

表4 MT区における作業工程と作業測定結果

月日	作業工程	使用機械類	使用資材類など	作業時間 s/10a	燃料消費量 mL/10a	電力消費量 kWh/10a
03/26	播種床用土消毒	蒸気消毒機 (灯油)		2387	12988	
04/14	塩水選/種子消毒		比重1.13/チラウム・チオファネート水和剤100g			
04/19	除草剤散布	動力散布機 (ガソリン)	グリホサート・イソプロピレンアミン塩液剤	907	115	
04/19	運搬	運搬車 (ガソリン)			197	
04/20	用土調整		濃硫酸0.75L/250L			
04/20	土壌混合	土壌混合機	複合肥料, カスガメイン・メタスルホカルブ粉剤	125		0.006
04/20	萌芽	電熱育苗器		9811		1.535
04/21	播種	自動播種機		522		0.007
04/21	出芽	電熱育苗器		50881		2.294
04/24	緑化・硬化	温風器				4.117
05/11	簡易耕起	ドライバハロー (軽油)		4359	4041	
05/12	殺虫剤箱使用		ベンフラカルブ粒剤			
05/13	植付け	5条兼用田植機 (ガソリン)	コシヒカリ専用肥料63.3kg	2282	658	
05/26	追肥	手動散粒機	NK-C6化成11.8kg	900		
05/26	除草剤散布	手動散粒機	プレチラクロール・ベンスルフロンメチル粒剤 3kg	674		
06/29	殺菌剤散布	手動散粒機	プロバネゾール粒剤 3 kg	373		
07/21	追肥	動力散布機 (混合ガソリン)	NK-C6化成11.6kg	216	45	
08/18	殺菌殺虫剤散布	動力散布機 (混合ガソリン)	MPP・フサライド・ベンシクロン・EPP 各剤 3kg	316	90	
10/03	収穫	バインダー (ガソリン)		187	49	
		脱穀機 (軽油)		664	139	
		自脱コンバイン (軽油)		4550	2598	
09/25	運搬	運搬車 (ガソリン)	走行距離3103m		451	
09/25	乾燥	張込み乾燥機 (灯油)	温度47℃	3807	7492	11.475
				19338		71.721
10/02	初搾り・調製	乾燥機初搾機グレーダー		(小計) 3253		4.918 17.623 0.303
04/23	土壌改良剤散布	ブロードキャスター (軽油)	珪酸カルシウム100kg 珪リン20kg	194 181	107 102	
合 計				105927	29682	113.998

注1) 面積24.4aにおける測定値を10a当りに換算した。

水稲作3方式間における人為的二酸化炭素発生量の比較

表5 CT区における作業工程と作業測定結果

月日	作業工程	使用機械類	使用資材類など	作業時間 s/10a	燃料消費量 mL/10a	電力消費量 kWh/10a
03/26	播種床用土消毒	蒸気消毒機 (灯油)		2387	12998	
04/14	塩水選/種子消毒		比重1.13/チラウム・チオファネート水和剤100g			
04/20	用土調整		濃硫酸1.5L/500L			
04/20	土壤混合	土壤混合機	複合肥料, カスガミン・メタスルホカルブ粉剤	125		0.006
04/20	催芽	電熱育苗器		9811		1.534
04/21	播種	自動播種機		522		0.007
04/21	出芽	電熱育苗器		50881		2.294
04/24	緑化・硬化	温風器				4.117
05/07	代かき	ドライブハロー (軽油)		3731	2594	
05/12	殺虫剤箱使用		ベンフラカルブ粒剤			
05/13	植付け	5条兼用田植機	コシヒカリ専用肥料63.6kg	2449	691	
05/26	追肥	手動散粒機	NK-C6化成11.6kg	1015		
05/26	除草剤散布	手動散粒機	プレナクローラ・ペンシルフロンメチル製剤3kg	507		
06/29	殺菌剤散布	手動散粒機	プロパナゾール粒剤3kg	407		
07/21	施肥	動力散布機 (混合ガソリン)	NK-C6化成11.6kg	229	52	
08/18	殺菌殺虫剤散布	動力散布機 (混合ガソリン)	MPP・フサライド・ペンシクロン・EBDP殺菌剤3kg	316	90	
09/20	収穫	バインダー (ガソリン)		205	52	
		脱穀機 (軽油)		585	137	
		自脱コンバイン (軽油)		4254	2738	
09/20	運搬	運搬車 (ガソリン)	走行距離3103m		339	
09/20	乾燥	張込み乾燥機 (灯油)	温度43℃	3471	7627	9.871
				20235		75.107
09/22	初摺り・調製	乾燥機初摺機グレーダー		(小計) 2656		4.292
						13.304
						0.240
11/27	土壤改良剤散布	ブロードキャスター (軽油)	珪酸カルシウム100kg	186	90	
		ブロードキャスター (軽油)	熔リン40kg	170	64	
12/09	耕うん	ロータリー (軽油)		3351	3691	
		合 計		106484	31163	110.772

注1) 面積23.3aにおける測定値を10a当りに換算した。

表6 発生源別の二酸化炭素発生量

(単位 = CO₂kg/10a)

項 目	DS区	MT区	CT区
燃 料	45.93 (53)	73.74 (63)	79.50 (66)
電 力	33.63 (38)	34.28 (30)	33.31 (28)
農 薬	8.07 (9)	7.93 (7)	7.65 (6)
合 計	87.63 (100)	115.95 (100)	120.46 (100)

注1) ()内は各項目の内訳 (%)である。

注2) 化学肥料は該当せず。

め、次いで電力由来が28~38%, 農薬由来が6~9%であった。水稲作においても発生量の削減目標を、燃料や電力というエネルギー関連項目の改善に集中すべきということ、これらの結果は示している。全工程から発生する二酸化炭素量 (CO₂kg/10a)を表6の合計欄から読取ると、DS区がCT区の73%, MT区が96%であった。

主要作業工程別の二酸化炭素発生量 (CO₂kg/10a)を表7に示す。DS区では①初乾燥 (燃料+電力), ②張込み (電力), ③ロータリー耕うん (燃料), ④代かき (燃料)の順, MT区では①土壤消毒 (燃料), ②初乾燥, ③簡易耕起 (燃料), ④コンバイン収穫 (燃料)の順, CT区では①土壤消毒, ②初乾燥, ③ロータリー耕うん, ④コンバイン収穫の順であった。これらのことから、土壤消毒や初乾燥といういずれも燃料を大量に消費する工程からの二酸化炭素発生量が問題であり、改善を急ぐ必要がある。

作物の単位乾物収量当たりの二酸化炭素発生量という観点から3方式を比較した結果を表8に示す。収穫対象物である初乾物収量当たりの発生量としては、DS区はCT区の64%, MT区

表7 主要作業工程別の二酸化炭素発生量

項 目	(単位 = CO ₂ kg/10a)		
	DS区	MT区	CT区
土壌消毒	0	32.55 (28.1)	32.55 (27.0)
代かき	8.12 (9.3)	0	6.97 (5.8)
簡易耕起	0	10.86 (9.4)	0
コンバイン収穫	7.35 (8.4)	6.99 (6.0)	7.36 (6.1)
籾乾燥	18.21 (20.8)	18.76 (16.2)	19.10 (15.9)
張込み	9.62 (11.0)	4.45 (3.0)	2.97 (2.5)
籾摺り・調製	4.44 (5.1)	5.39 (4.6)	4.07 (3.4)
ロータリー耕うん	8.32 (9.5)	0	9.92 (8.2)

注1) () 内は各項目の内訳 (%) である。

表8 作物の単位乾物収量当たりの二酸化炭素発生量

項 目	DS区	MT区	CT区
籾乾物収量 (kg/10a)	546 (115)	567 (120)	473 (100)
全乾物収量 (kg/10a) (籾+藁+根)	1471 (111)	1458 (110)	1329 (100)
CO ₂ 発生量 (CO ₂ kg/ 籾 kg)	0.161 (64)	0.205 (81)	0.253 (100)
CO ₂ 発生量 (CO ₂ kg/ 全乾物 kg)	0.059 (64)	0.081 (88)	0.092 (100)

注1) 収量は坪刈り収量値である。

注2) 根の乾物値は T/R 比を4.0と仮定して算出した。

注3) () 内は CT 区を100とした時の比率である。

は81%であり、DS区が最少、MT区が次いでいた。つぎに、水稻のT/R比（地上部と地下部の乾物量比）を4.0と仮定して全生産乾物量当たりの二酸化炭素発生量を比較すると、DS区はCT区の64%、MT区は88%であり、ここでもDS区が最少となった。

以上のように、対照のCT区に比較して、DS区とMT区ではともに1単位量の乾物を生産する際に人為的原因で発生する二酸化炭素の顕著な削減効果がみられた。とくに、DS区はMT区に比べて一層顕著な削減効果をもつことが確認できた。

二酸化炭素発生量の面で直播は有望視されるが、そのさまざまな利点にもかかわらずわが国の場合、ある程度以上には普及し難いのが現状である。将来は別として、このような流動的・過渡的な状況の中で、著者らが研究を進めている「簡易耕起移植栽培 (MT)」が、既存体系の改善策の一つとして入り込む余地は充分にあると確信している。すなわち、農家が保有する田植機をそのままの形で利用でき、比較的高い環境保全効果が期待でき、収量的にも遜色のない栽培システムの一つと考えられるからである (林2002a, 米川2002)。

一方、圃場の、大きさや形状、土壌の種類や状態、農業機械の種類、作業者の熟練度などによって、同一の水田においても二酸化炭素発生量が異なる多様な状況が想定される。数多くの事例測定に基づく個別データを地道に蓄積していくこと以外、この種の問題に対処する近道はないと考えられる。

引用文献

Allmaras, R.R., H.H. Schomberg and C.L. Douglas Jr. (1999): Conservation tillage's unforeseen advantage.

Resource 6(12); 7-8.

Borin, M., C. Menini and L. Sartor (1997): Effects of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. *Soil and Tillage Research* 40; 209-226.

Gajasen, J. (1995): Energy analysis of wetland rice systems in Thailand. *Agr. Econ. and Env.* 52; 173-178.

Hayashi, H., K. Yonekawa, H. Konno and N. Sakai (2000): Reducing effect of environmental load and yield characteristics in a transplanted paddy field under minimum tillage system. Program and Abstract of 7th JIRCAS International Symposium; 19.

林 久喜・木村知美・米川和範・菅原慶子・坂井直樹 (2002): 灰色低地土における水稲簡易耕起移植栽培の収量特性. *農作業研究* 37 (別1); 103-104

林 久喜・宝代稲子・坂井直樹 (2002): 水稲の簡易耕起移植栽培における根系の発達. *農作業研究* 37 (別1); 105-106.

坂井直樹・米川智司・木谷 収 (1994): 不耕起栽培による二酸化炭素発生量の低減効果. *農業機械学会誌* 56; 71-78.

坂井直樹・林 久喜・大山真由己・今野 均・米川和範・遠藤織太郎 (1998): 水稲の簡易耕起移植栽培における作業性と収量性. *農作業研究* 33; 139-146.

坂井直樹 (2002): (総説) 地球温暖化防止への効果が期待される農業技術動向. *農林技術センター研究報告* 15; 1-11.

米川和範・木村知美・菅原慶子・林 久喜・坂井直樹 (2002): 黒ボク土における水稲簡易耕起移植栽培の収量特性. *農作業研究* 37 (別1); 101-102.

Comparison of Carbon Dioxide Produced by Artificial Inputs among the Three Cultivation Methods of Paddy

Hitoshi KONNO¹, Naoki SAKAI^{2*},
Kazunori YONEKAWA¹ and Hisayoshi HAYASHI²

¹ Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577, Japan

² Institute of Agriculture and Forestry, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan

Abstract

We investigated the carbon dioxide produced by artificial causes on energy and materials inputs among the three different cultivation methods, direct seeding (DS), transplanting with minimum tillage (MT) and transplanting with conventional paddling and leveling (CT), at the paddy fields in University of Tsukuba. Total working times (s/10a) were 45 % of CT for DS and 99 % of CT for MT. When the working time on farms pulled out from the total working time, the working time on farm of MT was 85 % of CT. Total fuel consumption in all working processes were 57 % of CT for DS and 93 % of CT for MT. Total carbon dioxide produced by fossil fuel, electric power and chemicals were 73 % of CT for DS and 96 % of CT for MT. It is necessary to improve the working processes of thermal disinfection of soil and drying paddy because the both working processes consume a lot of fossil fuel. The carbon dioxide production based on the dry matter yield of rice per unit area, the values were 64 % of CT for DS and 81% of CT for MT. When we presumed the T/R ratio was supposed to be 4.0 in paddy, the carbon dioxide production per total dry matter yield of paddy were 64 % of CT for DS and 88 % of CT for MT. Finally, DS was the most superior and MT was the second in the three cultivation methods from the viewpoint of reducing carbon dioxide produced by artificial inputs.

Key words : Carbon dioxide, Conventional transplanting, Direct seeding, Global warming, Minimum tillage, Paddy

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