

「エアアシスト条播機」を用いて湛水直播した多収性水稻品種タカナリの乾物生産と収量

—栽植様式が湛水直播栽培した水稻の生態生理に及ぼす影響—

向山雄大¹⁾・本林隆¹⁾・帖佐直¹⁾・大川泰一郎¹⁾・古畑昌巳²⁾・東城清秀¹⁾・平沢正¹⁾

(¹⁾ 東京農工大学大学院農学府, ²⁾ 中央農業総合研究センター北陸研究センター)

要旨：エアアシスト条播機を用いて湛水直播した水稻（以下、エアアシスト水稻）の収量、乾物生産特性を倒伏抵抗性水稻品種タカナリを用いて 2009 年～2011 年の 3 ヶ年にわたって検討した。苗立ち時のエアアシスト水稻個体の分布は点播や慣行移植した水稻と大きく異なり、条の周囲に個体が分散し、散播に近い状態であった。エアアシスト水稻は、点播水稻や慣行移植した水稻に比較して乾物生産が大きくなったことによって収量が高くなった。エアアシスト水稻は、点播した水稻に比較して出穂期以後、そして慣行移植した水稻に比較して全生育期間を通して、個体群成長速度 (CGR) が高かった。エアアシスト水稻の CGR が大きかった要因として、エアアシスト水稻は、(1) 分げつ期は慣行移植した水稻に比較して茎数の増加が著しいことによって、葉面積指数 (LAI) が大きく、ひいては個体群受光率が大きかったこと、(2) 出穂期以降は慣行移植した水稻や点播した水稻に比較して、個体群吸光係数が小さいことがあげられた。そしてさらに、エアアシスト水稻は慣行移植した水稻や点播した水稻に比較して主茎に着生する冠根数が多く、地上部窒素蓄積量が大きいことによって、葉身の葉緑素含量が高く維持され、純同化率が高く維持されたことも出穂期以後の CGR が大きくなった要因と考えられた。

キーワード：エアアシスト条播機、乾物生産、個体群吸光係数、個体群受光率、栽植様式、収量、水稻、登熟期窒素蓄積量。

現在、我が国では米を炊飯用だけでなく、米粉などの加工用や飼料用に用いるための栽培に力が入られ、さらにはバイオマスエネルギーとして利用する試みもなされている。このように飼料用など多用途利用に向けて水稻を生産していくためには、省力的でコストを削減できる水稻栽培が求められる。10 a 当り稲作労働時間は第二次世界大戦後から昭和 50 年代までは耕起、田植、収穫作業を中心に減少したが、それらの減少は近年では鈍化傾向にある。我が国では現在育苗箱に水稻種子を播種し、数週間後に苗を水田に移植する移植栽培が平成 21 年時点で約 99% を占めている（農林水産省 2012）。移植栽培においては育苗・移植の作業が全体の作業時間の 25～35% を占めるので（農林水産省 2011a）、これら春作業を省略できる直播栽培技術の導入促進が図られている（農林水産省 2011b）。

湛水直播栽培には苗立ちが不安定であることや、倒伏しやすいという問題があったが（姫田 1995）、倒伏軽減のために昭和 50 年代に湛水土壤中直播法が開発され、さらに播種後の落水管理や過酸化石灰被覆法の開発などによって従来の方法よりも安定した苗立ちを得ることができるようになった（中村 1976, 三石・中村 1977a, b, 吉永ら 2000）。湛水直播栽培の安定性が改善されたことで、乾田直播栽培の面積が 1997 年の約 4500 ha から 10 年間に約 20% しか増加しなかったのに対して、湛水直播栽培は 1997 年の約

3100 ha から 10 年間で約 3.8 倍に栽培面積を拡大した（農林水産省 2011c）。

湛水直播栽培における播種様式には散播、条播、点播があるが、最も省力的に播種が可能なのは散播である。しかし、2006 年の湛水直播の栽培面積は条播が 7500 ha、点播が 2400 ha であるのに対して、散播は 600 ha（農林水産省 2011b）で、条播、点播と比較して栽培面積が小さく、普及していないのが現状である。この要因として、不均一な苗立ちによる初期生育の不安定性が挙げられる（帖佐ら 2009a）。すなわち散播は種籾を均一に散布することが必ずしも容易ではなく、覆土も困難であるため、圃場内で苗立ちの不均一性を生じやすく、鳥害のリスクも高い（帖佐ら 2009a）。

「エアアシスト条播機」は独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構によって開発された空気圧によって種籾を条播する播種機である（帖佐ら 2007）。「エアアシスト条播機」による播種は、通常の散播と比較して種籾が土中に埋没するため、浮き苗の防止や、落水出芽を行う際の鳥害を軽減する効果がある（帖佐ら 2009a）。また、従来の条播や点播と比較して作業効率が良く、播種作業に費やす作業時間を大幅に減少させることができる（帖佐ら 2009b）。

最近の倒伏抵抗性を備えた多収性品種は、移植水稻、湛水直播水稻のいずれにおいても、慣行の 1 株約 3 本植えよりも 1 株 1 本立てで株密度の高い栽植様式の方が葉が直立

第1表 基肥として施用した肥料の種類と成分、量。

年	堆肥 (kg m ⁻²)	化成肥料 (成分量)			緩効性窒素肥料 (成分量)			
		N (g m ⁻²)	P ₂ O ₅ (g m ⁻²)	K ₂ O (g m ⁻²)	LP40 (g m ⁻²)	LP50 (g m ⁻²)	LPS100 (g m ⁻²)	LPS120 (g m ⁻²)
2009	約 1.8	5	5	5	2.5	—	2.5	—
2010	約 1.8	4	4	4	—	2.5	—	4.5
2011	約 1.8	4	4	4	—	2.5	—	4.5

化成肥料は燐加安 42 号 (14-14-14, コーペケミカル社), 緩効性窒素肥料は溶出タイプの異なる被覆尿素 (ジェイカムアグリ社) を用いた。

しやすく, 受光態勢が良好になるために乾物生産や子実収量が高くなることが明らかにされている (San-oh ら 2004, 本林ら 2007, 安川ら 2008)。このことは, 近年育成された受光態勢が良く, 倒伏抵抗性の高い多収性品種は慣行の移植栽培の株密度, 栽植様式では充分にその能力が発揮されないことを示している。併せて, 上述の湛水直播水稻における散播の持つ問題点がある程度解決されれば, 多収性水稻の散播による湛水直播栽培は移植栽培よりも, そして, さらに点播などの栽植様式よりも高い収量をあげうる可能性を示すものである。

そこで本研究は, 「エアアシスト条播機」の特徴に着目して, 本機を用いて播種された倒伏抵抗性水稻が, どのような生育をし, 乾物生産や収量をあげうるかを, 水稻の生理生態的視点から慣行の移植栽培や他の栽植様式で湛水直播栽培された水稻と比較, 検討した。

材料と方法

1. 栽培条件

倒伏抵抗性品種タカナリを供試し, 東京農工大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センターの水田 (東京都府中市) 内の圃場 (多摩川沖積土壌) に 2009 年, 2010 年, 2011 年の 3 ヶ年にわたって栽培した。肥料はすべて基肥として施用し, 施用した肥料の種類と量を第 1 表に示した。肥料が 3 ヶ年で少し異なったことを除けば, 他の栽培方法は 3 ヶ年ともほぼ同様であったので, ここでは 2010 年の栽培方法を記す。5 月 12 日に過酸化カルシウム剤 (カルパー粉粒剤, 保土谷化学工業) を乾物対比等倍で被覆した種子をエアアシスト条播機を用いて条間を 30.0 cm 及び 15.0 cm に設定して播種した (それぞれ AAD30 区, AAD15 区)。併せて条間 30.0 cm, 株間 10.0 cm, 1 株 5 粒, 深さ約 1 cm で手播き点播した区 (以下, HS 区) を設けた。また, 同日育苗箱に播種し, 育苗した苗を 6 月 4 日に条間 30.0 cm, 株間 18.8 cm で機械移植した (以下, CT 区)。

各区 4 反復で栽培し, 1 反復の大きさは AAD30 区, AAD15 区は 72.5 m², HS 区は 30 m², CT 区は 60 m² であった。AAD30 区と AAD15 区については苗立ち期に 60 cm × 60 cm の調査枠を用いて各区 10 ヶ所の苗立ち数の調査を行い, 平均的な個体密度を算出し, あわせて平均的な苗立ち数を示した場所をその後の茎数, 葉面積, 乾物重, 個体群受光率, 個体群吸光係数などの測定に供した。

2. 乾物重と収量の調査

乾物重の測定は株をすべて根元から土ごと採取し, 土を洗いおとし, 根を切除した後, 葉身, 葉鞘 (稈を含む), 穂に分け, 80℃で通風乾燥した。葉面積は乾燥前に自動面積計 (AAM-9, 林電工社製) を用いて測定した。採取した面積は反復あたり 0.36 m² であった。

収穫期には反復あたり 0.72 m² (0.36 m² の区画を連結して 2 ヶ所) を 3 ヶ所, 計 2.16 m² 採取し, 収量の測定を行った。粒厚 1.8 mm 以上の玄米を精玄米とし, 水分含有率 14.5% で玄米収量を求めた。

3. 個体群受光率, 個体群吸光係数の測定

受光率の測定は個体群に入射する光強度と個体群の条間の地表面における光強度をシリコンフォトダイオード (S-1133, 浜松フォトニクス社製) を 3 cm おきに 6 個並べた長さ 15 cm のセンサーを用いて散乱光下で測定し, 下記の式によって算出した。

$$\text{個体群受光率 (\%)} = (1 - I_b/I_0) \times 100$$

I_0 : 個体群に入射する光強度

I_b : 個体群地表面の光強度

個体群吸光係数を求めるに当っては, 条間の光強度を上述の光センサーを用いて散乱光下で地表面から高さ 10 cm ごとに測定し, 相対照度を算出した。その後に層別刈取りを行い, 各層ごとの相対照度と積算葉面積指数との関係から Monsi und Saeki (1953) の方法で個体群吸光係数を算出した。

4. 葉色と植物体窒素濃度の測定

葉の緑色程度 (SPAD 値) の測定は主茎に着生する葉の葉身中央部を葉緑素計 (SPAD502, MINOLTA 社製) を用いて行った。植物体窒素濃度の測定は乾物重を測定した株を用い, 地上部各器官を粉碎後 CN コーダー (MT-600II, ヤナコ分析工業社製) で行った。

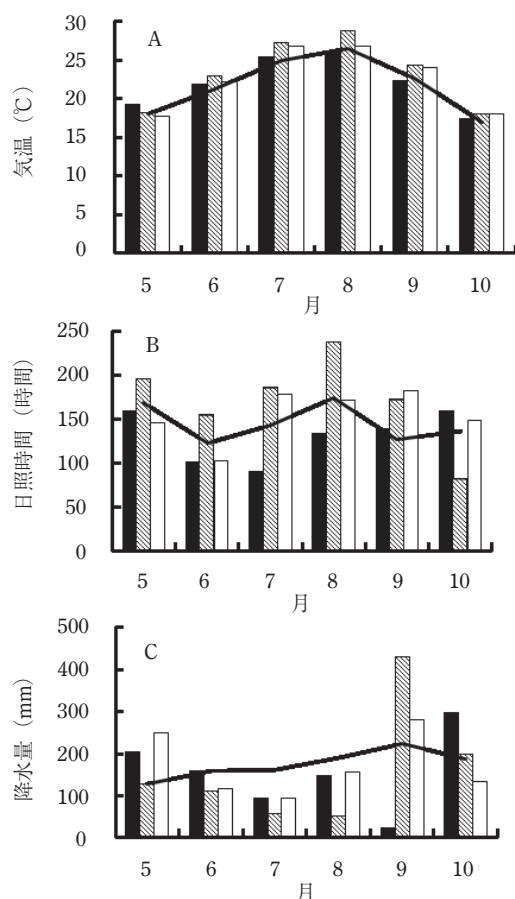
5. 冠根数調査

円筒コア法 (川田・片野 1976) で直径 15 cm, 高さ 40 cm の円筒を用いて株が中心となるようにして土壌塊を採取した。採取した土壌塊を丁寧に水洗いした後, 70% エタノールで根を固定し, 後日主茎に着生する冠根数の測定を行った。

結 果

1. 気象条件

3ヶ年の月平均気温、月総日照時間、月総降水量及び平年値を第1図に示した。平均気温は2009年は生育期間全



第1図 平均気温 (A), 日照時間 (B), 降水量 (C) の推移 (気象庁 2011)。

■: 2009 年, ▨: 2010 年, □: 2011 年. 折れ線グラフは 1981 年から 2010 年の平均値. アメダス府中地点のデータ。

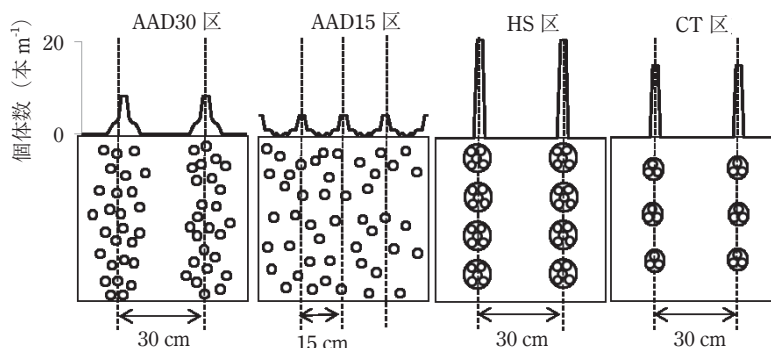
体を通してほぼ平年並みに推移し、2010 年は 6 月から 9 月まで、2011 年は 7、9 月が平年値を上回った。日照時間は 2009 年は 6～8 月が短く、逆に 2010 年は 5～9 月の 5 ヶ月間にわたって長く、2011 年は 6 月が短く、7、9 月が長かった。降水量は 2009 年は 7～9 月が少なく、2010、2011 年は 6～8 月が少なく、9 月が多かった。このように水稻生育期間中の気象条件は年によってやや異なっていた。

2. 苗立ち個体の密度と分布

苗立ち期における個体数は年による違いはあったものの、AAD30 区、AAD15 区、HS 区はほぼ等しく、CT 区は他の区に比べてやや少なかった (第2表)。圃場内における個体分布は AAD30 区、AAD15 区と HS 区、CT 区で大きく異なった (第2図)。すなわち、AAD30 区と AAD15 区では個体が条を中心分散し散播に近く、特に AAD15 区ではほぼ均一に個体が分散していた。これに対して HS 区と CT 区では個体が株状に密集しており、全て個体が条の中心に沿って分布していた。

3. 乾物生産及び収量

AAD30 区は 3 ヶ年ともに収穫期の地上部乾物重が CT 区に比較して有意に大きく、AAD15 区も 2010 年を除いて CT 区に比較して有意に大きかった。そして AAD30 区、AAD15 区は HS 区に比較して有意ではないが大きい傾向があった (第2表)。部分刈取り収量はいずれの年においても AAD30 区、AAD15 区が HS 区、CT 区よりも有意に大きかった。AAD30 区、AAD15 区と CT 区の収穫指数はいずれの年においても区間に明らかな違いは認められなかった。AAD30 区、AAD15 区の収量が CT 区よりも高かったのは、AAD30 区と AAD15 区の乾物生産量が大きかったことによるものである。一方、HS 区は AAD30 区、AAD15 区に比較して乾物重とともに収穫指数がわずかであるが小さい傾向があったことが子実収量が有意に小さくなった要因であった。



第2図 苗立ち期の圃場内個体分布の模式図。

小さい丸が1個体を示す。点線は条の中心を示す。苗立ち時の種子の深さは AAD30 区、AAD15 区はそれぞれ 5.1 ± 1.6 mm (平均値 $\pm$ 標準偏差), 5.2 ± 1.5 mm, HS 区は 5.8 ± 1.3 mm であった。

第2表 収量、収穫期地上部乾物重及び収量構成要素.

年	区	播種量 (g m ⁻²)	苗立ち密度 (本 m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	1穂穎花数	単位面積当たり穎花数 (×10 ³ m ⁻²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	部分刈取り収量 (g m ⁻²)	乾物重 (g m ⁻²)	収穫指数 (%)
2009	AAD30	4.0	94.4	358 a	178 a	71.9 a	78.6 a	21.4 a	990 a	2297 a	42.8 a
	AAD15	4.0	85.0	380 a	185 a	64.0 a	70.6 a	21.1 a	977 a	2354 a	41.3 a
	CT	—	—	279 b	204 a	56.8 a	76.5 a	20.7 a	866 b	2078 b	42.7 a
2010	AAD30	5.0	147.9	257 a	212 a	54.0 ab	88.4 a	18.8 a	956 a	2012 a	45.0 a
	AAD15	5.0	162.3	280 a	221 a	61.2 a	87.9 a	17.9 a	927 a	2190 ab	42.2 a
	HS	5.0	155.1	270 a	182b	49.2 b	76.6b	18.9 a	781b	1934 ab	42.5 a
	CT	—	48.9	245 a	206 a	50.7 b	86.9 a	18.7 a	801b	1823 b	43.5 a
2011	AAD30	3.7	68.1	320 a	205 ab	65.4 a	84.6 a	20.0 a	957 a	2048 a	49.0 a
	AAD15	3.7	75.1	313 a	213 a	66.8 a	82.1 a	20.0 a	952 a	2104 a	48.2 a
	HS	3.7	72.0	326 a	188 b	61.2 ab	71.1 b	20.1 a	814 b	1893 ab	41.8 a
	CT	—	57.1	274 b	189 b	51.8 b	86.5 a	20.2 a	773 b	1719 b	45.0 a

同じアルファベットは同じ年の中で5%水準で有意差がないことを示す(フィッシャーのLSD検定, 第3, 4, 5, 6, 7表も同様). 千粒重, 収量は水分15%での値. 登熟歩合は精玄米数を籾数で割って求めた.

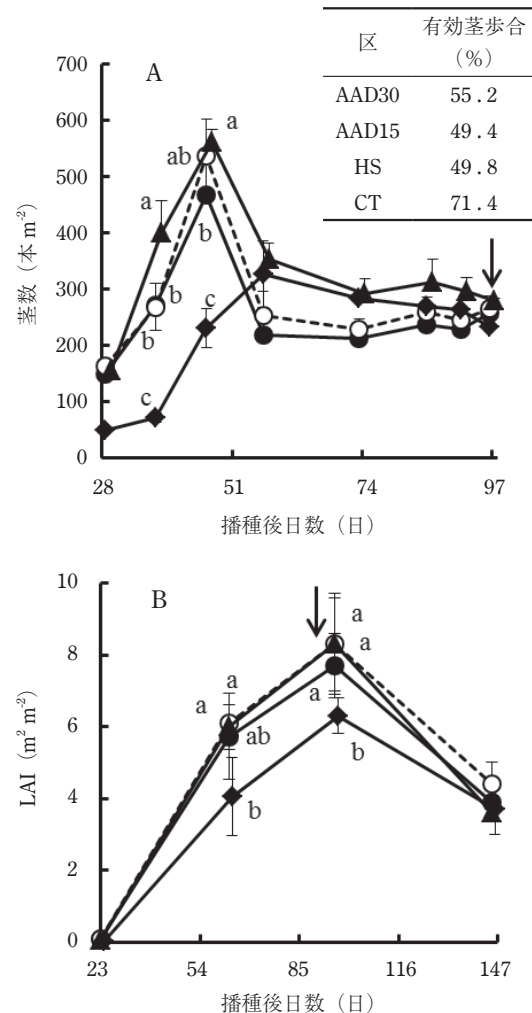
穂数は全ての年においてAAD30区, AAD15区がCT区よりも多い傾向があり, 1穂穎数はAAD30区, AAD15区がHS区よりも有意に多かった. その結果, m²当たり穎数はAAD30区, AAD15区がHS区, CT区よりも3ヶ年を通して多い傾向が認められた. さらにHS区はAAD30区, AAD15区, CT区よりも登熟歩合が有意に低くなった. AAD30区, AAD15区ではm²当たり穎数が多かったにもかかわらず, 登熟歩合, 千粒重に明らかな低下は認められなかった.

以上のように, AAD30区, AAD15区はHS区, CT区よりも乾物生産量が大きいことによって子実収量が増加すること, そしてHS区はAAD30区, AAD15区に比較して乾物生産量は有意に低くないにもかかわらず登熟歩合が低いことによって子実収量が低いことが明らかになった. そこで各水稻の生育の過程と乾物生産の過程を収量構成要素にも着目して検討を行った.

4. 茎数, 葉面積

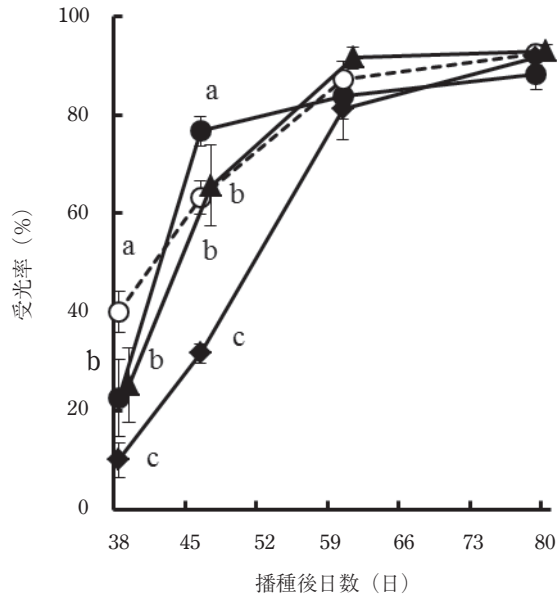
まず茎数の推移から生育過程を比較した. 茎数は3ヶ年ともほぼ同様の傾向が認められたので2010年の結果を示した(第3図A). 湛水直播栽培したAAD30区, AAD15区, HS区は播種後4~6週の間茎数が急速に増加し, 最高茎数はCT区に比較して有意に著しく多くなった. 有効茎歩合はAAD30区, AAD15区とHS区がCT区よりも15~20%低くなったが, 出穂期の茎数はAAD30区, AAD15区とHS区はCT区よりもわずかであるが多かった.

茎数の急速な増加に伴って播種後23日から最高分けつ期の間AAD30区, AAD15区とHS区の葉面積指数(LAI)は急速に増加した(第3図B). その後もLAIの差は維持され, 出穂期のLAIはAAD30区, AAD15区とHS区はCT区に比較して明らかに大きかった.



第3図 茎数 (A), 葉面積指数 (LAI, B) の推移 (2010年).

●: AAD30区 ○: AAD15区 ▲: HS区 ◆: CT区. 図中のバーは標準偏差 (n=4). 矢印は出穂日を示す. CT区の移植日は播種後23日であった. 図中の同じアルファベット間には5%水準で同一播種後日数の区間に有意差がないことを示す(フィッシャーのLSD検定).



第4図 個体群受光率の推移 (2010年)。

●: AAD30区, ○: AAD15区, ▲: HS区, ◆: CT区. 図中のバーは標準偏差 (n=4) を示す. 図中の同じアルファベット間には5%水準で同一播種後日数の受光率に有意差がないことを示す (フィッシャーのLSD検定).

第3表 個体群吸光係数.

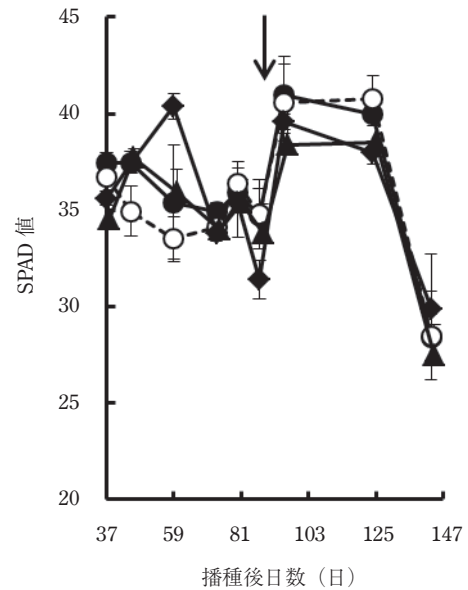
年	測定時期	区	吸光係数
2009	出穂後 2週	AAD30	0.23±0.05 a
		AAD15	0.29±0.02 ab
		CT	0.33±0.03 b
2010	出穂後 1週	AAD30	0.42±0.08 a
		AAD15	0.42±0.03 a
		HS	0.46±0.05 a
		CT	0.60±0.02 b
2011	出穂後 1週	AAD30	0.32±0.03 a
		AAD15	0.32±0.02 a
		HS	0.39±0.05 ab
		CT	0.49±0.07 b

平均値 ± 標準偏差 (第4, 5, 6表も同様).

5. 個体群受光率および個体群吸光係数

葉が十分に繁茂していない生育初期には葉面積の拡大による日射吸収量の違いが乾物生産に影響する. そこで, 日射吸収量の大きさと密接な関係のある個体群受光率を比較した (第4図). 個体群受光率は播種後38日ですでにAAD30区, AAD15区およびHS区がCT区に比較して有意に大きく, 播種後46日になると個体群受光率はAAD30区, AAD15区, HS区が63.2~73.7%であったのに対してCT区は31.6%と明らかに小さかった. 播種後60日を過ぎると個体群受光率の区間差は認められなくなった.

葉が十分に繁茂し, 草冠が閉じた後は受光態勢が乾物生



第5図 展開完了最上位葉の緑色程度 (SPAD 値) の推移 (2010年)。

●: AAD30区, ○: AAD15区, ▲: HS区, ◆: CT区. 図中のバーは標準偏差を示す. 図中のバーは標準偏差 (n=4) を示す. 矢印は出穂日を示す.

産に大きな影響を及ぼす. そこで, 穂揃い期以降の草冠の個体群吸光係数を比較し, 受光態勢の検討を行った (第3表). その結果, 2009年のAAD15区を除けばいずれの年においてもAAD30区, AAD15区の個体群吸光係数はCT区よりも有意に小さかった. また, AAD30区, AAD15区のいずれも個体群吸光係数はHS区と比較して小さい傾向があった.

6. 葉身の緑色程度, 地上部窒素蓄積量

展開完了最上位葉のSPAD値を全生育期間にわたって比較した. その結果, SPAD値は播種後約2ヶ月の分けつ期はAAD15区が低く, CT区が高かったが, その後出穂期までは区間の差は明らかではなかった. 登熟期はAAD30区, AAD15区はHS区, CT区よりも高く推移した (第5図). SPADの区間差を葉位別に比較すると, 出穂期には2011年のCT区を除いてAAD30区, AAD15区とCT区で止葉のSPADがHS区よりも有意に高かったが, 止葉の2葉下の葉 (III葉) のSPADに有意差は認められなかった (第4表). 出穂2週間後には止葉のSPADがAAD30区, AAD15区において2010年はHS区, そして両年ともCT区よりも高くなった. III葉においてもCT区に比較して2010年はAAD30区で, AAD15区は両年ともSPADが有意に高く, AAD15区はHS区に比較して2011年は有意に高かった. 収穫期にはIII葉のSPADがAAD30区, AAD15区がHS区に比較して有意に高く, CT区に比較してAAD15区が有意に高かった.

出穂期の地上部窒素蓄積量はAAD30区, AAD15区, HS

第4表 出穂期、出穂2週間後及び収穫期の止葉と第III葉のSPAD値.

年	区	出穂期		出穂2週間後		収穫期	
		止葉	III葉	止葉	III葉	止葉	III葉
2010	AAD30	34.7±1.4 a	37.2±1.4 a	40.0±0.6 a	38.8±0.5 a	29.5±1.7 a	26.1±1.3 ab
	AAD15	34.8±1.8 a	37.1±1.2 a	40.8±1.2 a	38.5±1.0 a	28.7±1.3 a	27.4±1.5 a
	HS	31.4±1.0 b	37.5±1.3 a	38.0±0.6 b	37.4±0.6 ab	27.7±1.9 a	22.4±0.6 c
	CT	33.8±1.5 a	36.1±0.5 a	38.5±1.4 b	36.3±1.4 b	27.9±1.0 a	24.5±0.2 b
2011	AAD30	41.8±2.8 a	41.1±3.4 a	44.9±0.8 a	41.2±0.3 ab	—	—
	AAD15	39.8±0.7 a	38.7±0.6 a	44.8±0.8 a	41.9±0.3 a	—	—
	HS	36.7±1.4 b	39.2±2.9 a	43.5±0.9 ab	40.4±0.3 b	—	—
	CT	39.9±4.1 ab	39.7±2.2 a	42.8±0.6 b	40.5±0.8 b	—	—

止葉より2葉下の葉を第III葉とした.

第5表 播種後3週、出穂期及び収穫期の地上部窒素蓄積量 (g m⁻²).

年	区	地上部窒素蓄積量			
		播種後3週 (A)	出穂期 (B)	収穫期 (C)	
2010	AAD30	0.25±0.11 a	20.6±0.6 a	24.6±0.1 a	20.4±0.6 a
	AAD15	0.25±0.11 a	22.9±2.4 a	27.7±1.6 a	22.7±2.4 a
	CT	0.10±0.03 a	19.8±2.6 a	21.6±1.2 b	19.7±2.6 a
2011	AAD30	0.29±0.12 a	14.7±1.3 a	22.3±0.7 a	14.5±1.6 a
	AAD15	0.29±0.12 a	16.1±1.4 a	23.3±1.5 a	15.8±1.9 a
	HS	0.10±0.07 a	15.3±1.4 a	20.6±1.0 b	15.0±2.3 a
	CT	0.04±0.02 b	14.1±1.3 a	19.5±1.6 b	13.8±1.3 a
2011	AAD30	0.29±0.13 a	17.8±1.3 a	24.3±1.9 a	17.5±1.3 a
	AAD15	0.29±0.13 a	16.2±1.6 a	24.9±1.8 a	16.0±1.6 a
	HS	0.10±0.07 a	17.1±2.2 a	20.8±1.6 b	17.0±2.2 a
	CT	0.04±0.02 b	14.6±2.0 a	19.0±1.7 b	14.5±2.0 a

区がCT区に比較して高い傾向があったものの有意ではなかった. しかし, 収穫期の窒素蓄積量はAAD30区とAAD15区はHS区, CT区に比較していずれの年においても有意に高くなった(第5表). 播種後3週から出穂期, 出穂期から収穫期の窒素蓄積量の増加を比較すると, 播種後3週から出穂期の増加量の区間差は有意ではなかったが, AAD30区, AAD15区およびHS区はCT区に比較して大きい傾向があった. 一方, 出穂期から収穫期の増加量はAAD30区, AAD15区はHS区, CT区よりも有意に大きかった.

7. 主茎に着生する冠根数

主茎に着生する冠根数はAAD30区, AAD15区がそれぞれ96.1, 97.0本で, HS区, CT区の70.1, 61.8本と比較して約1.5倍と著しく多かった(第6表).

8. 個体群成長速度, 平均葉面積指数, 純同化率

最後に, AAD30区, AAD15区とHS区, CT区の乾物生産過程を成長解析によって検討した(第6表). 播種後3週から出穂期の間の個体群成長速度(CGR)は2009年,

第6表 主茎に着生する冠根数(登熟期, 2011年).

区	株当たり茎数	冠根数
AAD30	6.0±1.1 b	96.1±9.5 a
AAD15	4.5±0.7 b	97.0±14.3 a
HS	11.3±1.9 a	70.1±7.7 b
CT	13.6±2.5 a	61.8±6.4 b

株はAAD30区, AAD15区は1個体, HS区, CT区は複数個体から構成されている. 冠根数は主茎1本当たりの数. 平均的苗立ち密度を示した場所から平均的穂数を示した株を採取し, 測定に供した.

2011年はAAD30区, AAD15区, HS区がCT区よりも大きい傾向があった. 出穂期から収穫期のCGRは2010年, 2011年はAAD30区, AAD15区がHS区, CT区よりも大きかった.

CGRが異なった要因を検討すると, 播種後3週から出穂期の間には平均LAIがAAD30区, AAD15区, HS区がCT区に比較して高く, 出穂期から収穫期の間も平均LAIはAAD30区, AAD15区, HS区がCT区よりも高かった. 純同化率(NAR)は播種後3週から出穂期は区間の違いがなかったが, 出穂期から収穫期ではHS区は他の区に比較し

第7表 個体群成長速度 (CGR), 平均 LAI, 純同化率 (NAR) の比較.

年	区	CGR ($\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)		平均 LAI ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)		NAR ($\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	
		播種後3週	出穂期	播種後3週	出穂期	播種後3週	出穂期
		出穂期 ～ 収穫期	～ 収穫期	出穂期 ～ 収穫期	～ 収穫期	出穂期 ～ 収穫期	～ 収穫期
2009	AAD30	23.0 a	14.3 a	7.1 a	9.1 a	3.2 a	1.6 b
	AAD15	23.1 a	15.2 a	7.8 a	10.2 a	2.9 a	1.5 b
	CT	17.7 b	15.6 a	4.8 b	6.2 b	3.7 a	2.5 a
2010	AAD30	16.9 a	15.7 a	3.9 a	5.8 a	4.3 a	2.7 a
	AAD15	19.4 a	15.7 a	4.2 a	6.4 a	4.6 a	2.5 a
	HS	16.8 a	12.3 b	4.2 a	6.0 a	4.0 a	2.1 b
	CT	16.6 a	12.4 b	3.2 b	5.0 b	5.2 a	2.5 a
2011	AAD30	19.6 a	13.7 a	4.2 a	6.2 a	4.7 a	2.2 ab
	AAD15	17.7 ab	14.6 a	3.9 a	6.0 a	4.5 a	2.4 a
	HS	17.9 ab	11.9 b	4.5 a	6.3 a	4.0 a	1.9 b
	CT	15.0 b	11.0 b	3.3 b	5.0 b	4.5 a	2.2 ab

て小さい傾向が認められ, 特に2010年にはAAD30区, AAD15区, CT区よりも有意に小さかった. このように, AAD30区, AAD15区, HS区は播種後3週から出穂期では平均 LAI が大きいことによって CGR が CT 区より大きく, 出穂期から収穫期の間では AAD30区, AAD15区は CT 区, HS 区に比較してそれぞれ平均 LAI, NAR が大きいことによって CGR が大きくなった.

考 察

1. エアーアシスト条播機の特徴

まず, エアーアシスト条播機の特徴を整理してみたい. エアーアシスト条播機は空気圧を用いて種子を土中に埋没させる播種機である. 本機を用いた播種は一般の播種機と比較して作業時間を大幅に短縮することができるほか, 土中に種子を埋没させることで苗立ちや初期生育の安定性を確保することができる (帖佐ら 2009a). また, 種子の落下する角度などから条の形成幅が 60 mm 程度であると推定されている (帖佐ら 2009a). 種子の播種深度, 苗立ち個体密度を実際に調査したところ, AAD30区, AAD15区の播種深度の平均値は約 5 mm であり, HS 区の約 6 mm より播種深度はやや小さかった. また, エアーアシスト条播機で播種すると, 苗立ち期の個体は条の周囲に分散し, 点播とは大きく異なった (第2図). このように本研究で見出された「エアーアシスト条播機」で播種した水稻の播種深度, 個体分布はこれまでに調査されている結果と概ね同じであった. 倒伏程度を比較すると, CT 区は3ヶ年を通じて倒伏は全く認められなかったが, AAD30区, AAD15区は, 2009年は9月下旬の台風18号, 2010年は9月下旬の降雨, 2011年は9月下旬の台風15号によっていずれも軽微な倒伏が認められた. 大川・石原 (1992) の基準に基づく, AAD30区, AAD15区の倒伏程度は2009年はそれぞれ2, 3, 2010年はいずれも1, 2011年はいずれも2であった. なお,

2010年, 2011年はAAD30区, AAD15区とHS区の間倒伏程度には違いは認められなかった.

2. エアーアシスト条播機で播種した水稻の生育の特徴

エアーアシスト条播機を用いて播種した水稻は以上のように播種深度, 個体の分布に特徴が見られた. そこで次に, エアーアシスト条播機で播種した水稻の生育の特徴を整理する. エアーアシスト条播機で播種した水稻は慣行移植栽培した水稻と同程度の生育を示す (帖佐・古畑 2009c), あるいは, 打ち込み式土中点播機を用いて播種した水稻よりも収量が向上することなどが比較的倒伏しやすい品種であるコシヒカリで報告されている (古畑ら 2011). しかし, 近年育成された受光態勢が良く, 倒伏抵抗性の高い品種を用いた検討や生育の詳しい解析は行われてこなかった. 本研究の結果, 各区のタカナリの生育特性は生育ステージによって明らかに異なることが分かった.

AAD30区, AAD15区はCT区よりも播種後3週から出穂期までは平均 LAI が大きいこと, 出穂期から収穫期までは平均 LAI が大きいにもかかわらず NAR を大きく維持したことによって全生育期間を通して CGR が大きかった (第7表). 一方, HS 区の CGR は AAD30区, AAD15区に比較して播種後3週から出穂期までは違いはなかったが, 出穂期から収穫期の期間は NAR が小さいことによって小さくなった. そこで次に, AAD30区, AAD15区がCT区, HS区に比較して LAI, NAR が異なった要因を生育特性に着目して考察したい.

3. エアーアシスト条播機で播種した水稻の生態生理

湛水直播水稻は移植時の種子根や冠根の切断がなく, 株基部が浅い位置にあるために低位節からも分げつが発生し, 分げつ数が多くなることが報告されている (柗木・金 1991, 寺田 1984). 事実, 湛水直播した AAD30区, AAD15

区, HS 区は移植した CT 区に比較して分げつ期の茎数の増加が大きかったことによって LAI が著しく増加した (第 3 図 A, B). その結果, AAD30 区, AAD15 区, HS 区は分げつ期の個体群受光率が高くなった (第 4 図). 吸収日射量から乾物への変換は生育のごく末期を除いては生育時期や環境条件によらず一定であり, 吸収日射量と個体群受光率の間には密接な関係があり, 併せて個体群受光率と乾物生産にも密接な関係がある (堀江・桜谷 1985). 生育初期は AAD30 区, AAD15 区, HS 区は個体群受光率が高かったことによって CGR が高くなったと考えられる.

LAI が十分に大きくなり, 草冠が完全に閉じて個体群受光率に違いがなくなった後は, 個体群を透過する光が乾物生産に影響し (斎藤ら 1990a, b, 徐ら 1997, San-oh ら 2008), LAI が大きくなった個体群の乾物生産には受光態勢が影響を及ぼす. AAD30 区, AAD15 区は CT 区に比較して明らかに受光態勢が良く, HS 区と比較しても受光態勢が良い傾向があった (第 3 表). AAD30 区, AAD15 区は受光態勢が良く, 個体群内への光の透過性が高かったことが出穂期の LAI が高かったにもかかわらず NAR が高かった要因になっていると考えられる. 受光態勢は栽植様式の影響を受け, 同じ個体密度でも株密度が高い栽植様式の栽培条件下で受光態勢が良くなる (San-oh ら 2004, San-oh ら 2006) ので, エアアシスト条播機の散播に近い播種様式が受光態勢を良くしたと考えられる.

茎数の急速な増加によって AAD30 区, AAD15 区, HS 区は CT 区に比較して有効茎歩合が低くなった. 一般に水稻栽培では過剰な分げつを抑え, 過繁茂を回避することが倒伏を防ぎ, 乾物生産, 収量を高めるために重要であるとされている (松島 1973, 松島 1990). しかし, 無効茎となる分げつで固定された炭素が無効茎が枯死する時に有効茎に転流する可能性が考えられており (中村 1963, 王・花田 1982, 石塚・田中 1969), 無効分げつも生産に寄与していることが推察されている. 無効分げつ茎が多いことが倒伏や受光態勢の悪化を引き起こさなければ, 無効分げつそのものは乾物生産阻害要因になることは考えにくい. 前述のように, 本研究で供試したタカナリは倒伏抵抗性があり, 登熟後期までは倒伏が認められなかった. AAD30 区, AAD15 区では, このように問題となる倒伏の発生がなかったことが, F₁ 品種に見られるような初期生育の旺盛さ (石原 1997) が生育後期まで保持されることになった要因であると考えられる.

散播状の栽植様式となった AAD30 区, AAD15 区は HS 区, CT 区に比較して出穂後の止葉及び第 III 葉の SPAD が高く維持された (第 5 図, 第 4 表). この結果は AAD30 区, AAD15 区では登熟期間中, 葉身の窒素含量が高く維持され, 葉身の光合成も高く維持されたことを示唆し (三王ら 2002), このことによって AAD30 区, AAD15 区の NAR が高くなったと考えられる. AAD30 区, AAD15 区の登熟期間中の地上部窒素蓄積量は HS 区, CT 区に比較して明

らかに高く, 登熟期間中, AAD30 区と AAD15 区では窒素吸収が大きかったことが葉の窒素含量維持に寄与していたものと推察された (第 5 表).

水稻が吸収する窒素は肥料や灌漑水だけでなく, 土壌中で無機化する窒素が大きな割合を占める (前田 1983, 庄司・前 1984, 深山 1988). 無機化する土壌窒素の効率的な利用が水稻の生育には重要で (李・太田 1972, 樋口・吉野 1986), 窒素の吸収には根量が影響すると考えられている (San-oh ら 2006, Taylaran ら 2009). 出穂期から収穫期の窒素蓄積量の増加が大きかった AAD30 区, AAD15 区は主茎に着生する冠根数が HS 区, CT 区よりも著しく多かった (第 6 表). 湛水直播水稻において茎あたりの冠根数が増加するとこれに伴って根量が増加する (San-oh ら 2006) ことから, 圃場における根系の発達の詳細は今後検討する必要があるが, 根系が良く発達していることが AAD30 区, AAD15 区の窒素蓄積量が HS 区, CT 区に比較して増加した要因であると考えられた.

4. 生育, 乾物生産過程と収量構成要素

水稻の生育過程と収量構成要素には密接な関係があるので (松島 1990), エアアシスト条播が生育, 乾物生産過程と収量構成要素に及ぼした影響について検討したい. AAD30 区, AAD15 区, HS 区は生育初期の茎数の増加が大きく (第 3 図 A), 茎数の急速な増加によって AAD30 区, AAD15 区, HS 区は穂数が多くなったと考えられる (第 2 表). また, 出穂後は AAD30 区, AAD15 区, CT 区が HS 区に比較して NAR が高かった. NAR が高くなったことによって AAD30 区, AAD15 区, CT 区の登熟歩合は HS 区に比較して高くなったと考えられる. 以上より, AAD30 区, AAD15 区は CT 区に比較して生育初期の茎数の増加が大きかったことによって単位面積当たり穂数が多くなり, HS 区に比較して出穂後の NAR が高かったことによって登熟歩合が高くなり, 収量が多くなったと考えられる.

5. 倒伏抵抗性多収水稻の特徴を發揮させる栽植様式

以上, エアアシスト条播機を用いて湛水直播した倒伏抵抗性水稻品種タカナリの収量, 乾物生産と生態生理について, 点播, 慣行移植栽培との比較を通して検討した. エアアシスト条播機では苗立ちの均一性などに改良すべき点は残されているが, 本機で播種された水稻は湛水直播栽培の特徴である分げつ期の茎数, 葉面積の増加が大きく, より多くの日射を吸収することに加えて, 条の形成幅が広く, 条の周囲に個体が散らばることによって個体群吸光係数が小さくなり, 根系が発達して窒素蓄積量が多くなるなどの特徴を持つことが示された. これらの特徴は, 近年飼料用などに向けて育成された倒伏抵抗性多収水稻品種の収量, 乾物生産の増加に寄与するものである. 今後, さらに異なる品種や環境条件などで検討を行う必要があるが, 苗立ちの安定性と倒伏抵抗性を改善することができれば, 湛

水直播栽培におけるエアアシスト条播,あるいはこれに準ずる播種様式は慣行移植栽培や点播湛水直播栽培よりも多収をあげる可能性が本研究を通して示された。

謝辞: 本学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技術職員 松川孝治氏には, エアアシスト条播機を用いての播種ならびに機械移植に際して, 多大なご協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

引用文献

- 帖佐直・大嶺政朗・古畑昌巳・松村修 2007. 水稲直播の高速条播技術に関する研究. 農作業研究 42 (別 1): 87-88.
- 帖佐直・古畑昌巳・大嶺政朗・松村修 2009a. 水稲湛水直播栽培のためのエアアシスト条播技術の開発-播種機の概要とエアアシストの効果-. 農作業研究 44: 211-218.
- 帖佐直・古畑昌巳・元林浩太・細川寿・青木政晴・土屋学・鈴木尚俊・守田和弘・杉森史郎 2009b. GPS によるエアアシスト条播の作業能率解析. 農作業研究 44 (別 1): 15-16.
- 帖佐直・古畑昌巳 2009c. エアアシスト条播による水稲湛水直播の生育および収量の調査. 農作業研究 44 (別 1): 73-74.
- 古畑昌巳・帖佐直・塩谷幸治・塚本隆行・関正裕・細川寿 2011. エアアシスト湛水直播栽培の現状と課題・展望. 北陸作報 46: 45-48.
- 樋口太重・吉野喬 1986. 高収性水稲の窒素吸収特性について. 土肥誌 57: 134-141.
- 姫田正美 1995. 第 1 巻 直播稲作研究四半世紀のあゆみ. 櫛瀾機欽也監修, 直播稲作への挑戦. 農林技術協会, 東京. 1-279.
- 堀江武・桜谷哲夫 1985. イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究. (1) 個体群の吸収日射量と乾物生産の関係. 農業気象 40: 331-342.
- 石塚喜明・田中明 1969. 水稲の栄養生理. 養賢堂, 東京. 1-364.
- 石原邦 1997. 作物の生理生態からみた多収性-水稲を例として. 農及園 72: 19-24.
- 桃木信幸・金忠男 1991. 水稲の高密度散播直播栽培における生育制御. 北陸農試報 33: 55-81.
- 川田信一郎・片野学 1976. 水稲冠根の土壤中における伸長方向について. 日作紀 45: 471-483.
- 李鐘薫・太田保夫 1972. 水稲根の形態および機能と地上部諸形質との関連について. 農試研報 D24: 61-105.
- 前田乾一 1983. 水田に施用された窒素の行動の定量的評価. 農研センター研報 1: 121-192.
- 松島省三 1973. 稲作の改善と技術-理想稲による多収安全良質稲作-. 養賢堂, 東京. 1-393.
- 松島省三 1990. 収量構成要素からみた多収性の原理. 松尾孝嶺・清水正治・角田重三郎・村田吉男・熊沢喜久雄・蓬原雄三・星川清親・石原邦・平田熙・石井龍一編, 稲学大成. 第2巻 生理編. 農文協, 東京. 583-603.
- 三石昭三・中村喜彰 1977a. 水稲の湛水土壌中直播栽培に関する研究 第 1 報 過酸化石灰の粉衣方法と粉衣量. 日作紀 46 (別 1): 35-36.
- 三石昭三・中村喜彰 1977b. 水稲の湛水土壌中直播栽培に関する研究 第2報 播種機の構造と播種精度. 日作紀 46 (別 1): 37-38.
- 深山政治 1988. 水稲の最適窒素保有量に基づく新しい施肥基準策定法に関する研究. 千葉農試特報 15: 1-92.
- Monzi, M. und T. Saeki 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jpn. J. Bot. 14: 22-52.
- 本林隆・安川毅・Htie Hta Oo・大川泰一郎・平沢正 2007. 栽植密度が飼料用イネ品種「リーフスター」の乾物生産に及ぼす影響. 日作紀 (別 1) 223: 56-57.
- 中村広則 1963. 水稲分けつの独立性並びに無効分けつに関する生理的研究. 東北農試研報 28: 53-141.
- 中村喜彰 1976. 湛水直播用コーティング種子の基礎的研究. 農機誌 38: 75-78.
- 農林水産省 2011a. 農業経営統計調査 平成 22 年産 米生産費. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi_nousan/pdf/seisanhi_kome_10.pdf (2012 年 1 月 28 日閲覧).
- 農林水産省 2011b. 米の直播技術等の現状. http://www.maff.go.jp/j/study/kome_sys/09/pdf/data1.pdf (2012 年 1 月 28 日閲覧).
- 農林水産省 2011c. 水稲直播栽培の現状について. http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/all.pdf (2012 年 1 月 28 日閲覧).
- 農林水産省 2012. 水稲直播栽培技術の普及状況. http://www.maff.go.jp/j/press/seisan/sien/pdf/100611_1-01.pdf (2012 年 3 月 21 日閲覧).
- 大川泰一郎・石原邦 1992. 水稲の耐倒伏性に関する稈の物理的性質の品種間差異. 日作紀 61: 419-425.
- 斎藤邦行・下田博之・石原邦 1990a. 水稲多収性品種の乾物生産特性の解析. 第 1 報 密陽 23 号と日本晴の受光態勢の比較. 日作紀 59: 130-139.
- 斎藤邦行・下田博之・石原邦 1990b. 水稲多収性品種の乾物生産特性の解析. 第 2 報 早生・中生数品種間の比較. 日作紀 59: 303-311.
- 三王裕見子・富沢洋平・真野ゆう子・大川泰一郎・平沢正 2002. 湛水直播した水稲タカナリの乾物生産特性-慣行移植栽培した水稲との比較-. 日作紀 71: 317-327.
- San-oh, Y., Y. Mano, T. Ookawa and T. Hirasawa 2004. Comparison of dry matter production and associated characteristics between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationships to planting patterns. Field Crops Res. 87: 43-58.
- San-oh, Y., R.P. Oclarit, T. Ookawa, T. Motobayashi and T. Hirasawa 2006. Effects of planting pattern on the interception of solar radiation by the canopy and the light extinction coefficient of the canopy in rice plants direct-sown in a submerged paddy field. Plant Prod. Sci. 9: 334-342.
- San-oh, Y., M. Kondo, T. Ookawa and T. Hirasawa 2008. Ecophysiological analysis on effect of planting pattern on biomass production and grain yield in rice. JARQ 42: 79-89.
- 庄司貞雄・前忠彦 1984. 無機養分と水の動態. 佐藤庚・玖村敦彦編, 作物の生態生理. 文永堂, 東京. 97-171.
- Taylor R.D., S. Ozawa, N. Miyamoto, T. Ookawa, T. Motobayashi and T. Hirasawa 2009. Performance of a high-yielding modern rice cultivar Takanari and several old and new cultivars grown with and without chemical fertilizer in a submerged paddy field. Plant Prod. Sci. 12: 365-380.
- 寺田優 1984. 湛水土中直播栽培水稲の特徴. 農及園 59: 535-539.
- 王永琴・花田毅一 1982. 水稲の主茎および分けつ間における¹⁴C 同化産物の移動. 日作紀 51: 483-491.
- 徐銀發・大川泰一郎・石原邦 1997. 水稲多収性品種タカナリの収量と乾物生産過程の解析-1991年から1994年の4年間-. 日作紀 66: 42-50.
- 安川毅・Nan Su San・本林隆・大川泰一郎・平沢正 2008. 栽植密度が飼料用イネ品種関東飼 225 号の乾物生産と子実収量に及ぼす影

響. 日作紀 (別 2) 226 : 40-41.

吉永悟志・西田瑞彦・脇本賢三・田阪幸平・松島憲一・富樫辰志・

下坪訓次 2000. 湛水直播栽培における播種後の落水管理が施肥窒

素の動態および水稻の生育・収量に及ぼす影響. 日作紀 69 : 481-486.

Dry Matter Production and Grain Yield of High Yielding Rice Cultivar, Takanari, Directly Seeded in the Paddy Field with an “Air-assisted Drill” : Effects of Planting Pattern on Ecophysiology of Direct Seeded Rice : Takehiro MUKOUYAMA¹⁾, Takashi MOTOBAYASHI¹⁾, Tadashi CHOSA¹⁾, Taiichiro OOKAWA¹⁾, Masami FURUHATA²⁾, Seishu Tojo¹⁾ and Tadashi HIRASAWA¹⁾ (¹⁾ *Grad. Sch. of Agr., Tokyo Univ. of Agri. and Tech., Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan;* ²⁾ *Natl. Agr. Res. Cent. Hokuriku Res. Cent.*)

Abstract : The lodging-tolerant rice cultivar, Takanari, was directly seeded with an “air-assisted drill” in the paddy field, and its dry matter production and grain yield were compared with those in the plants, hill-seeded and conventionally transplanted in 2009, 2010 and 2011. In the air-assisted drilled rice, plants were scattered around the row, which was quite different from the hill-seeded rice. The air-assisted drilled rice produced heavier dry matter and had a higher grain yield than the hill-seeded and transplanted rice, because of the higher crop growth rate. During the tillering stage, tiller number and leaf area index increased more rapidly in the air-assisted drilled rice than in the conventionally transplanted rice and this resulted in higher light interception of the canopy in the air-assisted drilled rice. Compared with the hill-seeded and conventionally transplanted rice, the air-assisted drilled rice had a lower light extinction coefficient of the canopy at the ripening stage and larger number of crown roots on the main stem with more nitrogen accumulation during the ripening period. These characteristics might contribute to the higher dry matter production in the air-assisted drilled rice.

Key words : Air-assisted drill, Dry matter production, Grain yield, Light extinction coefficient of the canopy, Light interception of the canopy, Nitrogen accumulation during ripening, Planting pattern, Rice.
