

品種・遺伝資源

水稻における登熟性の品種間差に関する研究 —登熟に及ぼす収量内容物と収量キャパシティの影響—

塩津文隆¹⁾・劉建¹⁾・豊田正範²⁾・楠谷彰人²⁾

(¹⁾ 愛媛大学大学院連合農学研究科, ²⁾ 香川大学農学部)

要旨: 水稻における登熟性の品種間差を解析するために, 25 品種の登熟歩合および精籼比重を比較した. 登熟歩合 (Y) と出穂期後の積算平均気温 (X) との関係は, 次の式によって表された.

$$Y = 100 - a \cdot \exp(-b \cdot X)$$

常数 b と X 切片は品種によって異なっていた. そこで, この常数 $b \times 10^5$ を登熟係数 (RI), X 切片を登熟開始温度 (ΣTs) とし, 登熟歩合 (R) および精籼比重 (S) との関係を検討した. R は RI と有意な正の相関関係を示し, S と ΣTs との間に有意な負の相関関係が認められた. さらに, 出穂期における茎葉中の貯蔵炭水化物量 (C) と出穂期後の乾物生産量 (ΔW) との和を収量内容物 ($C + \Delta W$), 総籼数 (N) と精籼容積 (V) との積を収量キャパシティ (NV) とし, これらと RI および ΣTs との関係を検討した. $(C + \Delta W) / NV$ は RI と有意な正の相関を示した. ΣTs とこれらの要因との間に直接有意な相関関係はみられなかったが, C が多い品種は ΣTs が低くなる傾向が認められた. これらより, 収量内容物 / 収量キャパシティ比の高い品種は登熟係数が大きいために登熟歩合が高くなり, 出穂期までに大量の貯蔵炭水化物を蓄積している品種は登熟の開始が早く, 精籼比重が大きくなると判断された.

キーワード: 収量キャパシティ, 収量内容物, 水稻, 精籼比重, 登熟性, 登熟歩合, 品種間差.

1960 年代後半からアジア各国で育成された半矮性の印度型や日印交雑型多収性品種により, 水稻の収量は大きく向上した. 同時に, その多収要因を解明するために光合成, 物質生産面からの研究が多数行われ, 多くの知見が集積されている. しかし, これらの品種の登熟性を直接の対象にした研究は比較的少ない. また, その登熟性については, 従来の日本型品種よりも劣るという報告 (小松ら 1984, 蔣ら 1988, 斎藤ら 1990a, b) と優れるという報告 (山本ら 1991, 楠谷ら 1993a) があり, 必ずしも一定していない.

村田 (1976) は, 水稻の収量をその入れ物の容量を表す収量キャパシティとその中身である収量内容物に分けて考察し, 全ての収量関連形質はこのどちらかを通じて収量に結びつく」と指摘した. しかしながら, 多収性品種の光合成や物質生産に関わる形質が収量キャパシティや収量内容物を介して, どのように登熟性に結びついているのかという道筋は十分明らかにされているとは言い難い.

本研究は, 今後の高登熟性多収品種の育成に資する基礎的知見を得るために, 登熟性の品種間差が生じる機構を解明しようと試みたものである. 本報ではまず, 収量内容物と収量キャパシティがどのような経路を経て登熟に関わっていくのかを検討した.

材料と方法

試験は, 2002 年と 2003 年に香川大学農学部内実験水田において, 以下の方法により 2 反復で実施した. 供試品種は両年で異なっていたが, ほぼ同様な結果が得られたので,

本報では主に 2003 年の結果について報告する.

1. 供試品種

2003 年の試験には, 第 1 表に示した 25 の品種・系統 (以下, 品種とする) を供試した. このうち, 品種番号 1~15 は日本および中国で育成された日本型品種で, 16~25 はアジア各国で多収を目的に育成された印度型, 日印交雑型などの品種である. ただし, 品種番号 12 の KU6 はオオセト × 松山三井, 13~15 の KU16, KU29, KU31 はオオセト × 山田錦の交雑後代から当農学部作物学研究室で選抜した F₉ 系統である. そこで, 以下の本文中では 1~15 を日本型品種, 16~25 を多収性品種と総称した. なお, 第 1 表に示した 25 品種のうち, KU6 から KU31 およびホシユタカとオオチカラ以外の 19 品種は, 2002 年と 2003 年に共通であった.

2. 栽培方法

2002 年は 5 月 21 日, 2003 年は 5 月 20 日に播種し, 23 日間畑育苗した苗をそれぞれ 6 月 13 日と 6 月 12 日に 22.2 株 m^{-2} (30 cm × 15 cm), 1 株 2 本で本田に手植えた. 肥料は, N, P₂O₅, K₂O を 10a 当たり 8.5 kg ずつ全量基肥で施用した.

3. 調査方法

両年とも各品種の出穂期に 9 株を採取し, 株毎の茎数, 地上部生体重を測定した. その後, これらの平均値に近い

3株を選んで部位別（葉、稈+葉鞘、穂）に分け、80℃で48時間通風乾燥させた後、乾物重を秤量した。これらの乾物試料は後日粉碎して全糖と澱粉の含有率を算出した。すなわち0.1gの試料を正確に計りとり、40℃の恒温槽中で80%アルコールにより糖を抽出した。抽出を3回繰り返して得られた液はまとめて、エバポレーターで減圧濃縮後、アンスロン硫酸法で全糖濃度を求めた。またアルコール抽出残渣に水を加えて加熱し、澱粉を糊化した後、 α -アミラーゼ溶液を加えて、40℃の恒温槽中で16時間加水分解し、全糖と同じ方法で分解された糖を定量した。なお、加水分解による分子量の増加を補正するため0.9を乗じた値を澱粉量とした。

2003年には、出穂期に上記とは別の9株を任意に選び、株内の長稈2茎について止葉中央部の葉色を葉緑素計SPAD-502（ミノルタ社製）によって測定した。その後、1週間おきに出穂期後7週間目まで同じ葉の葉色を追跡調査した。同時に、出穂期から1週間おきに7回、生育中庸の2株を採取してその全粒数を計数した後、水道水による水選を行った。水道水に沈んだ粒、すなわち比重1.00以上の粒を精粒とし、この数を全粒数で除して出穂期後1週間ごとの精粒数割合を算出した。なお、これらの調査は、2002年には行わなかった。

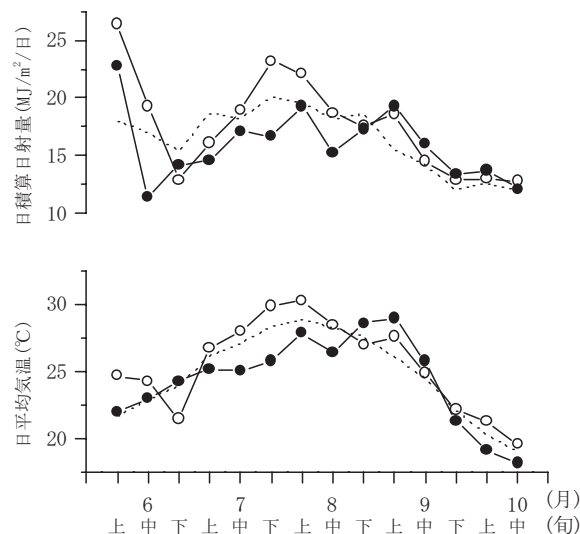
両年とも、成熟期に出穂期と同様の方法によって部位別乾物重を調査した。また、18株の穂数を計数し、その中から平均穂数に近い4株を選んで1穂粒数を調査した。続いて、この4株分の粒を用いて、比重1.00（水道水）、1.05、1.10、1.15および1.20の水選を行い、各品種の比重別粒数割合を求めた。その後、比重1.00以上の粒を再び混合して30℃で48時間乾燥してから500粒を任意に選び、その重量（精粒重）と容積（精粒容積）を津野ら（1990）の方法に従って測定した。比重1.00未満の粒については、触手により不稈粒を調査した。

以上の調査データに基づいて、出穂期と成熟期の m^2 当たり部位別乾物重、茎（稈+葉鞘）と葉身に含まれる出穂期までの貯蔵炭水化物量（全糖+澱粉）、出穂期後の乾物生産量、総粒数および収量構成要素（穂数、1穂粒数、登熟歩合、精粒1000粒重、精粒1000粒容積、精粒比重）を算出した。ただし、登熟歩合は比重1.00以上の精粒数割合とした（小松ら1984）。また、本試験では登熟歩合と精粒比重との積を登熟度とした（楠谷ら1993a, 1999）。

結 果

1. 気象経過

第1図に、実験圃場から北西約9kmにある高松地方気象台の2002年および2003年と平年（1992～2001年の過去10年間の平均値）における6月上旬から10月中旬までの日平均気温と日積算日射量を示した（注：気象庁電子閲覧室 <http://www.data.kishou.go.jp>）。2002年の気温は6月下旬と8月下旬に平年より低くなったが、全般的には平年並み



第1図 気象経過。

○—○：2002年，●—●：2003年，
…：平年（1992～2001年の過去10年間の平均値）。

か平年より高かった。2003年の気温は、6月中は平年並み、7月から8月上旬にかけては平年より低く推移しながら上昇した。その後、8月中旬に26.4℃まで強く低下してから再び上昇し、平年より1ヶ月遅い9月上旬に29.0℃で最高となった。このため、8月中旬の気温は平年より1.9℃低く、9月上旬の気温は平年より2.9℃も高かった。日射量は両年とも移植後一旦低下したが、2002年は7月下旬に平年より3.1 MJ/m²高くなり、その後は平年並みか平年より高く推移した。2003年は8月下旬まで平年より低く推移し、低温であった8月中旬には急激な低下がみられた。逆に9月上旬から9月中旬にかけての登熟初期には平年を上回った。

2. 供試品種および主な調査形質

第1表に供試品種と主な調査形質を示した。2003年の出穂期（HD）が最も早かったのは、津稲1129とキヌヒカリの8月12日、最も遅かったのはホシユタカの9月3日であり、多収性品種は出穂期が遅い品種が多かったが、品種群間に有意差はなかった。品種別に出穂期は、8月18日以前の6品種、8月20～26日の13品種、8月28日以後の6品種に分かれていた。そこで、以下ではそれぞれを早生品種、中生品種および晩生品種とした。なお、2002年と2003年の出穂期を比べると、2003年の方が2日前後遅くなった品種が多かったが、品種間での早晚傾向は両年ともほとんど同じであった。

2003年の登熟度（RD）は、塩選203号の1.166が最高で、中作23、コガネマサリ、キヌヒカリも1以上の値を示した。最低は、NAU303の0.666であった。日本型品種の平均値は0.895、多収性品種の平均値は0.887で多収性品種の方が低かったが、有意差は認められなかった。登熟歩合（R）は、塩選203号の95.6%が最も高く、NAU303の55.4%

第1表 供試品種の出穂期および登熟関連特性.

番号	品種名	2002年				2003年							
		HD	R	S	RD	HD	R	S	RD	ΣTs	RI	LI	LC
1	中作23	8・21	92.8	1.151	1.068	8・22	91.7	1.142	1.047	215	267	281	36.3
2	中作93	8・16	89.7	1.174	1.053	8・18	83.2	1.134	0.944	243	203	227	38.8
3	早花2	8・12	79.3	1.166	0.925	8・15	60.5	1.134	0.686	234	153	325	39.8
4	津星2	8・21	84.7	1.178	0.998	8・22	79.2	1.155	0.915	227	178	272	35.8
5	津稲1129	8・10	72.4	1.184	0.857	8・12	72.9	1.155	0.842	212	158	289	36.9
6	愛国	8・15	67.7	1.140	0.772	8・17	61.7	1.138	0.702	251	154	244	42.5
7	ナギホ	8・27	86.5	1.162	1.005	8・26	75.7	1.142	0.864	216	202	238	32.4
8	コシヒカリ	8・12	67.6	1.151	0.778	8・14	75.5	1.136	0.858	227	186	233	37.5
9	コガネマサリ	8・26	84.2	1.185	0.998	8・28	89.3	1.161	1.037	209	310	199	34.4
10	キヌヒカリ	8・12	80.0	1.172	0.938	8・12	87.4	1.147	1.003	223	215	263	37.2
11	ヒノヒカリ	8・27	76.5	1.145	0.876	8・28	79.0	1.136	0.897	239	230	236	31.5
12	KU6					8・25	86.3	1.153	0.995	226	218	303	35.3
13	KU16					8・31	80.3	1.150	0.923	260	250	283	30.3
14	KU29					8・24	71.1	1.145	0.814	191	205	266	33.8
15	KU31					8・29	77.5	1.160	0.898	245	181	335	36.1
16	桂朝2号	8・26	80.4	1.200	0.965	8・28	78.4	1.171	0.918	185	167	437	36.2
17	NAU303	8・25	48.0	1.177	0.565	8・25	55.4	1.203	0.666	189	116	372	37.6
18	塩選203号	8・26	80.8	1.216	0.983	8・25	95.6	1.220	1.166	192	401	248	36.0
19	来敬	8・24	63.1	1.183	0.746	8・22	66.7	1.174	0.783	188	171	280	39.5
20	水原405号	8・23	70.5	1.199	0.845	8・23	82.0	1.190	0.976	180	235	207	37.1
21	タカナリ	8・24	67.9	1.210	0.822	8・24	70.8	1.180	0.836	190	169	286	40.2
22	ハバタキ	8・19	77.0	1.180	0.909	8・21	83.2	1.158	0.963	196	221	300	39.4
23	アケノホシ	8・25	66.2	1.174	0.777	8・25	73.5	1.153	0.847	213	175	225	37.9
24	ホシユタカ					9・3	83.9	1.173	0.984	221	264	290	37.4
25	オオチカラ					8・20	64.9	1.130	0.733	259	164	264	45.7
全品種平均値		8・20	75.5	1.176	0.888	8・23	77.0	1.158	0.892	217	208	276	37.0
日本型品種平均値		8・18	80.1	1.164	0.933	8・22	78.1	1.146	0.895	228	207	266	35.9
多収性品種平均値		8・24	69.2	1.192	0.826	8・25	75.4	1.175	0.887	201	208	291	38.7
有意差		**	***	***	**	ns	ns	*	ns	**	ns	ns	*

品種番号1～15：日本型品種，16～25：印度型や日印交雑型などの多収性品種（多収性品種）。HD：出穂期（月・日），R：登熟歩合（%），S：精粒比重，RD：登熟度（ $R \times S$ ）， ΣTs ：登熟開始温度（℃），RI：登熟係数，LI：葉色値低下係数，LC：出穂期後1週間目の葉色値（SPAD-502型による測定値）。*，**，***，ns：t検定によって，日本型品種と多収性品種の平均値にそれぞれ5%，1%，0.1%水準で有意差あり，有意差なしを示す。

が最も低かった。これらはいずれも多収性品種であり，多収性品種は品種間のばらつきが大きかった。このため，日本型品種と多収性品種の平均値に有意差はみられなかった。精粒比重（S）は塩選203号の1.220が最も大きく，次がNAU303の1.203で，この2品種のみが1.200を上回っていた。最低は，オオチカラの1.130であった。品種群別平均値は，日本型品種1.146，多収性品種1.175で，多収性品種の方が有意に高かった。2002年のRDは，中作23，中作93，ナギホ，コガネマサリなどの日本型品種が1前後で高く，多収性品種のNAU303は0.6未満の低い値を示した。このため，品種群別平均値は日本型品種の方が有意に高くなった。Rも日本型品種の方が有意に高かったが，Sは多収性品種が日本型品種を有意に上回っていた。なお，両年に共通する19品種についてこれらの年次間相関係数を求めたところ，RDは $r=0.683^{**}$ ，Rは $r=0.708^{***}$ ，Sは $r=0.789^{***}$ となり，いずれにも有意な正の相関関係が認められた（図略）。

第2表にR，SおよびRDの相互間相関係数を示した。2002年，2003年ともRDはRと極めて強い正の相関を示

第2表 登熟歩合(R)，精粒比重(S)および登熟度(RD)の相互間相関係数.

年度	R-RD	S-RD	R-S
2002 (n=19)	0.922***	0.055	-0.070
2003 (n=25)	0.989***	0.284	0.144

***：0.1%水準で有意。

したが，Sとの間に有意な相関関係は認められなかった。RとSの相関係数も有意ではなかった。すなわち，両年ともRDはSよりもRの方に強く支配され，また，RとSとは無関係であった。

3. 収量内容物と収量キャパシティ

本研究では，翁ら（1982）および楠谷ら（1999）の考え方に従って，出穂期までの貯蔵炭水化物量（C）と出穂期後の乾物生産量（ ΔW ）との和（ $C + \Delta W$ ）で収量内容物，総粒数（N）と精粒1000粒容積（V）との積（NV）で収量キャパシティを表し， $(C + \Delta W)/NV$ を収量内容物/収量キャパシティ比とした。第3表は，2002年と2003年におけるこれらに関わる形質の平均値および品種間変異係数

第3表 収量内容物および収量キャパシティ関連形質 (2002年と2003年に共通する19品種)。

年度		C	ΔW	C+ ΔW	N	V	NV	C/NV	$\Delta W/NV$	(C+ ΔW)/NV
2002	全品種平均値	127	749	876	35674	22.29	796	0.158	0.970	1.128
	変異係数	45.0	17.1	17.3	19.6	7.7	21.7	37.5	22.3	19.6
	日本型品種平均値	95	750	844	31667	22.26	704	0.136	1.079	1.215
	多収性品種平均値	171	748	919	41185	22.32	922	0.189	0.820	1.009
	有意差 ¹⁾	**	ns	ns	**	ns	**	ns	**	*
2003	全品種平均値	95	287	381	31752	22.59	716	0.136	0.408	0.543
	変異係数	26.7	30.7	22.3	14.8	7.7	15.9	33.8	32.3	25.3
	日本型品種平均値	84	283	367	29809	22.34	663	0.132	0.428	0.560
	多収性品種平均値	109	292	400	34423	22.95	789	0.141	0.380	0.521
	有意差 ¹⁾	*	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns
	有意差 ²⁾	*	***	***	ns	ns	ns	ns	***	***

C: 出穂期までの貯蔵炭水化物量 (g/m²), ΔW : 出穂期後の乾物生産量 (g/m²), C+ ΔW : 収量内容物 (g/m²), N: 総粒数 (粒/m²), V: 精粒1000粒容積 (cm³), NV: 収量キャパシティ (cm³/m²), (C+ ΔW)/NV: ソース・シンク比.

*, **, ***, ns: t検定によって, 有意差¹⁾は日本型品種と多収性品種の平均値に, 有意差²⁾は年次間における全品種平均値にそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意差あり, 有意差なしを示す.

第4表 収量内容物および収量キャパシティ関連形質と登熟歩合, 精粒比重との相関関係.

年度		C	ΔW	C+ ΔW	C/NV	$\Delta W/NV$	(C+ ΔW)/NV
2002 (n=19)	R	-0.162	0.377	0.259	0.055	0.747***	0.746***
	S	0.492*	-0.026	0.164	0.398	-0.393	-0.278
2003 (n=25)	R	0.297	0.066	0.179	0.434*	0.261	0.431*
	S	0.423*	0.131	0.294	0.221	0.015	0.105

R: 登熟歩合, S: 精粒比重, C: 出穂期までの貯蔵炭水化物量, ΔW : 出穂期後の乾物生産量, C+ ΔW : 収量内容物, NV: 収量キャパシティ, (C+ ΔW)/NV: ソース・シンク比.

*, ***, **: それぞれ5%, 0.1%水準で有意.

を示したものである. ただし, 年次間差を比較するために, 2003年は両年に共通する19品種について示した.

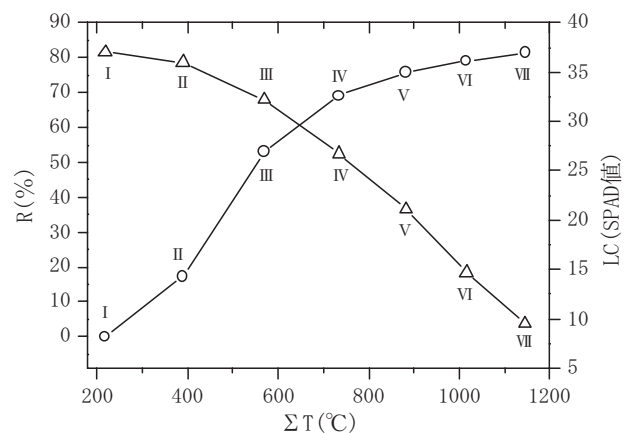
N, V, NV, C/NVを除く他の形質における平均値は, 2002年が2003年よりも有意に高かった. 主な形質について, 平均値の2003年/2002年比を求めてみると, Cでは0.75, ΔW では0.38, NVでは0.90であり, ΔW に特に大きな年次間差が認められた. このため, C+ ΔW , $\Delta W/NV$, (C+ ΔW)/NVの2003年/2002年比も0.5未満となった. また, ΔW の品種間の変異係数も2003年に大きくなった. 日本型品種群と多収性品種群の平均値を比較すると, 両年ともC, NおよびNVは多収性品種の方が有意に大きかったが, ΔW にほとんど差はなく, C+ ΔW にも有意差は認められなかった. このため, C/NVの平均値は多収性品種の方が高かったが, $\Delta W/NV$ と(C+ ΔW)/NVの平均値は日本型品種が多収性品種を上回っていた. ただし, 両年のC/NV, 2003年の $\Delta W/NV$ と(C+ ΔW)/NVに有意な品種群間差はみられなかった.

第4表に, これらの形質とRおよびSとの相関係数を示した. 相関係数の高低に差はあるが, 全体の傾向は2002年と2003年でほとんど変わらなかった. すなわち, 両年ともSはCとのみ有意な正の相関関係を示し, 他の形質との間に有意な相関関係は認められなかった. Rが(C+ ΔW)/NVと有意な正の相関を示し, C, ΔW およびC+ ΔW と関係がなかったことも両年に共通していた. ただし, (C+ ΔW)/NVをC/NVと $\Delta W/NV$ に分割してみた場合,

2002年のRは $\Delta W/NV$, 2003年のRはC/NVの方と有意な正の相関関係にあり, この点だけが両年で大きく異なっていた.

4. 登熟の温度反応

第2図に, 全品種平均の出穂期後の積算平均気温 (ΣT) と登熟歩合 (R) および葉色値の関係を示した. ΣT に対するRの上昇度は出穂期後2~3週間目にかけて高く, そ



第2図 全品種平均の登熟歩合 (R) および葉色値 (LC) の温度反応 (2003年).

○—○: 登熟歩合, △—△: 葉色値.

ΣT : 出穂期後の積算平均気温.

ローマ数字は, 出穂期後の週数を示す.

の後低くなり、 ΣT が 1000°C 前後になる6週間目からの増加はほとんどみられなかった。すなわち、 R は ΣT が大きくなるにつれて指数関数的に増加し、 $(100 - R)$ の自然対数値と ΣT の間には $r = -0.984^{***}$ の有意な負の相関関係が存在した。一方、葉色値は出穂期後1週間目が最も高く、2週間目にかけてやや低くなり、その後は直線的に低下した。葉色値と ΣT との相関係数は $r = -0.972^{***}$ であった。これらの傾向は、品種別にみても同様であった。そこで、 ΣT を X 、 R を Y_1 、葉色値を Y_2 として、これらの関係を次式に当てはめて登熟歩合と葉色の温度反応を解析した。

$$Y_1 = 100 - a_1 \cdot \exp(-b_1 \cdot X) \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$Y_2 = a_2 - b_2 \cdot X \cdots \cdots \cdots (2)$$

各品種の登熟歩合の温度反応は(1)式から求めた X 切片と常数 b_1 によって表される。すなわち、 X 切片は R の上昇が始まる ΣT を示し、この値が小さいほど登熟の開始が早いことを意味する。常数 b_1 は、値が大きいほど登熟開始後の温度に対する R の上昇が急であり、登熟速度が速いことを表す。そこで、(1)式の X 切片を「登熟開始温度(ΣTs)」、常数 $b_1 \times 10^5$ を「登熟係数(RI)」とし、これらによって品種の登熟性を評価した。また、(2)式に関しては、常数 b_2 が大きいほど登熟期における葉色値の低下が急なので、 $b_2 \times 10^4$ を「葉色値低下係数(LI)」として葉の退色速度を表す指標と考えた。

第1表に示したように、RIは塩選203号の401が格段に大きく、供試品種中最も登熟速度が速かった。逆に、NAU303のRIは116と小さく、最も登熟速度が遅かった。品種群別の平均値でみると、日本型品種は207、多収性品種は208で有意差は認められなかった。一方、 ΣTs は、水原405号の 180°C が最低、KU16の 260°C およびオオチカラの 259°C が最高であった。品種群別の平均値は、日本型品種 228°C 、多収性品種 201°C で、多収性品種の方が有意に低く、多収性品種において登熟の開始が早いことが認められた。LIは、日本型品種は平均266、多収性品種は平均

第5表 登熟係数(RI)および登熟開始温度(ΣTs)と登熟歩合(R)、精粒比重(S)および葉色値低下係数(LI)との相関係数(2003年)。

	R	S	LI
RI	0.824***	0.332	-0.397*
ΣTs	-0.082	-0.695***	-0.185

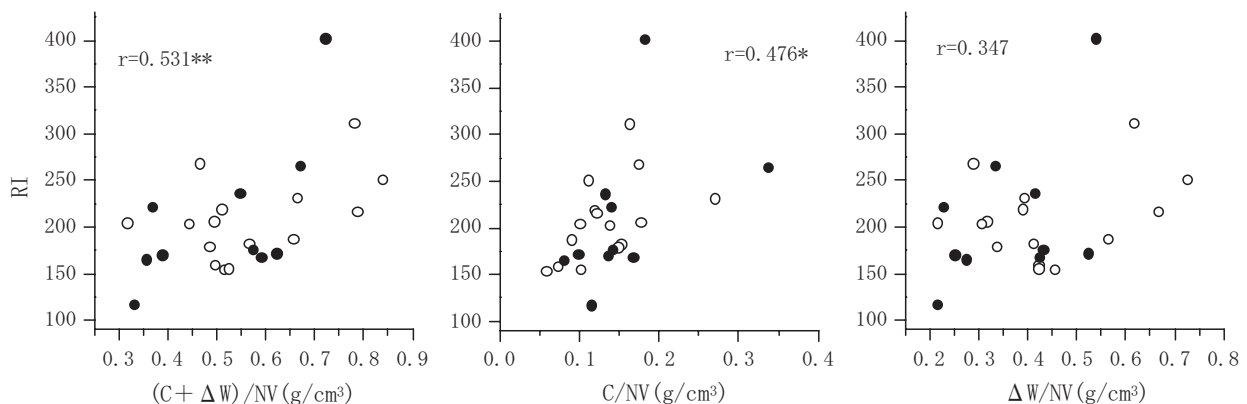
*, ***: それぞれ5%, 0.1%水準で有意。

291で、有意差はなかったものの多収性品種の方が大きかった。特に多収性品種の桂朝2号は437という著しく高い値を示した。しかし、出穂期後1週間目の葉色値(LC)の平均は、日本型品種35.9、多収性品種38.7であり、多収性品種の方が有意に高かった。すなわち、多収性品種は、日本型品種より登熟初期の葉色は濃い、その後は日本型品種よりも速い速度で葉色が薄くなっていく傾向がみられた。

第5表に、RIおよび ΣTs とR、SおよびLIとの相関係数を示した。RIとRの間には0.1%水準で有意な正の相関関係が存在したが、RIとSとの間に有意な相関関係は認められなかった。逆に、 ΣTs はSと0.1%水準で有意な負の相関を示したが、Rとは無関係であった。また、LIとの関係についてみると、RIとの間には5%水準で有意な負の相関関係が存在したが、 ΣTs との相関関係は有意ではなかった。

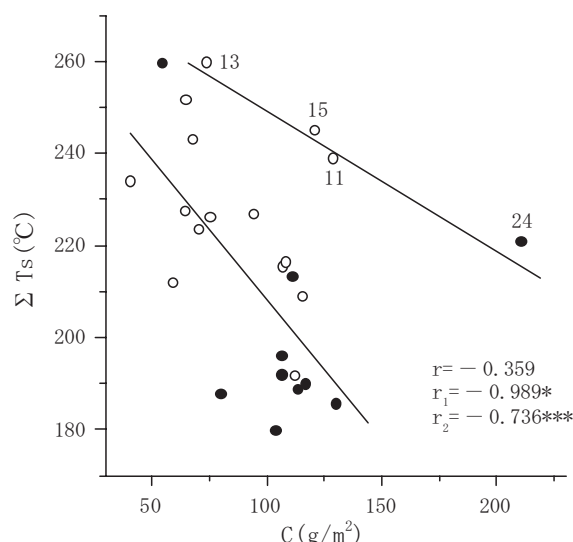
第3図は、 $(C + \Delta W)/NV$ 、 C/NV および $\Delta W/NV$ とRIとの関係をみたものである。RIは $(C + \Delta W)/NV$ と1%水準、 C/NV と5%水準で有意な正の相関を示したが、 $\Delta W/NV$ との間に有意な相関関係は認められなかった。すなわち、 $(C + \Delta W)/NV$ の値が高い品種ほどRIは高くなるが、その影響は $\Delta W/NV$ よりも C/NV の方が大きいと判断された。

第4図に、 C と ΣTs との関係を示した。全体の相関係数は有意ではなかったが、ヒノヒカリ(品種番号11)、KU16(同、13)、KU31(同、15)およびホシユタカ(同、24)の4品種は、 C が同程度でも他の品種より ΣTs が高かつ



第3図 出穂期における貯蔵炭水化物量(C)および出穂期後の乾物生産量(ΔW)の収量キャパシティ(NV)に対する比と登熟係数(RI)との関係(2003年)。

○: 日本型品種, ●: 多収性品種. *, **: それぞれ5%, 1%水準で有意。



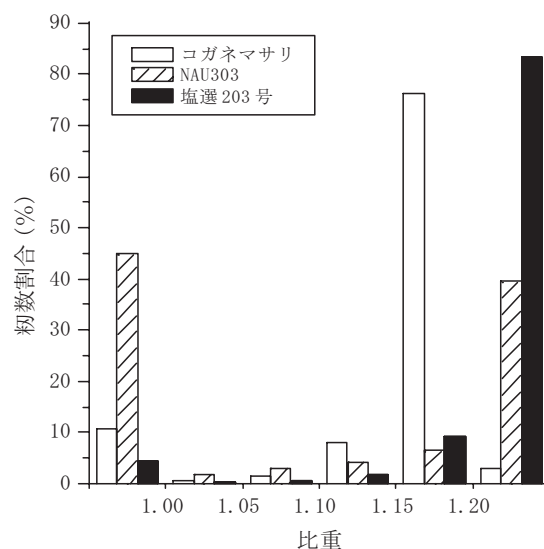
第4図 出穂期までの貯蔵炭水化物量(C)と登熟開始温度(ΣTs)との関係(2003年).

○: 日本型品種, ●: 多収性品種. r : 全体の相関係数,
 r_1 : 品種番号11, 13, 15および24のみの相関係数,
 r_2 : その他の品種の相関係数.
 *, ***: それぞれ5%, 0.1%水準で有意.

た. そこで, これら4品種を除いた相関係数を算出したところ, 0.1%水準で有意な負の値が得られた. また, 4品種のみに対する相関係数も5%水準で有意であった. なお, 他と異なる反応を示したこれら4品種はいずれも出穂期が8月28日以降の晩生品種であった. ただし, 同じ晩生品種であっても, コガネマサリと桂朝2号は中生, 早生品種と同じ線上に回帰した. 他の収量内容物および収量キャパシティ関連形質と ΣTs との間には, 特別な相関傾向はみられなかった.

5. 比重別粗数割合

第5図は, 2003年のコガネマサリ, NAU303および塩選203号の比重別粗数割合を示したものである. コガネマサリは比重1.00未満の粗数割合が10.7%で比較的高く, 1.00~1.05で一度大きく低下した後, 1.15~1.20まで徐々に増加していくというJ字型に近い分布を示した. ただし, 1.20以上の割合は低かった. NAU303は, 1.00未満と1.20以上の割合が44.9%と39.5%で高く, その間の割合が極端に低いというU字型の分布であった. 塩選203号は, 1.00未満が4.4%で1.00~1.15の0.4%~1.8%よりやや高く, 1.20以上の粗が83.5%を占めるといった逆L字型に分布していた. 他の品種についてみると, その程度に差はあるが, 日本型品種はコガネマサリと同様の形に分布していた. 多収性品種はNAU303に似たU字型分布を示すものが多かったが, 水原405号とハバタキは塩選203号に比較的近く, オオチカラは各比重層間の差が小さかった. なお, 多収性品種がこのような比重別粗数割合を示すことは, 楠谷ら(1993a), Osadaら(1973), 姚ら



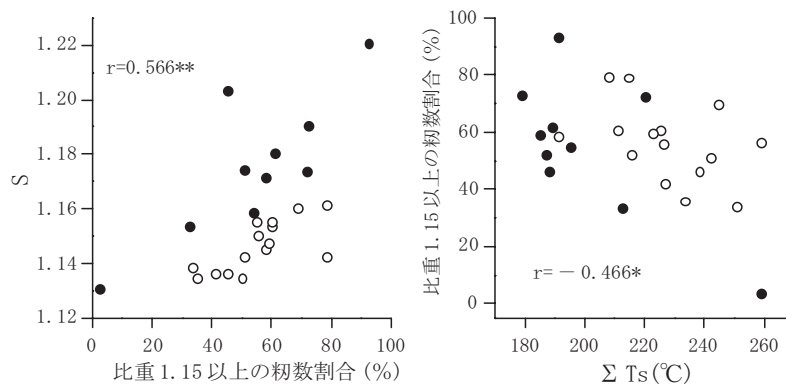
第5図 コガネマサリ, NAU303および塩選203号の比重別粗数割合(2003年).

(2000)によっても報告されているが, 2002年の試験においても同様の傾向が認められた. また, 図示した3品種の不稔歩合について比較すると, コガネマサリは4.4%, NAU303は14.1%, 塩選203号は3.0%で, NAU303が最も高かった. しかし, NAU303の不稔歩合は, 供試品種全体の中では愛国(22.3%), 来敬(15.1%)よりも低く, タカナリ(11.5%)やアケノホシ(10.5%)をわずかに上回る程度であった. 全品種の平均不稔歩合は9.8%であった.

第6図には, 比重1.15以上の粗数割合とSとの関係および ΣTs と比重1.15以上の粗数割合との関係を示した. 前者には1%水準で有意な正の, 後者には5%水準で有意な負の相関関係が認められた.

考 察

水稻における登熟性は, 比重1.06の塩水選で沈下した粗(精粗)数の割合, すなわち, 登熟歩合で評価されるのが一般的である. しかし, 登熟歩合は全体的な登熟傾向を判断する指標にはなるが, これによって登熟の詳細な内容まで知ることはできない. 例えば極端な場合, 比重1.06未満の粗が1割あれば, 残り9割の粗の比重が全て1.06丁度であっても, 1.20以上であっても, 登熟歩合ではともに90%と表現される. このため, 沈下した9割の粗の充実度には明らかな差があるにも関わらず, 登熟歩合でその差を比較することはできない. すなわち, 登熟歩合は一定の登熟基準に達した粗数の割合だけを示すもので, その基準以上の粗の登熟程度に関する情報は含まれていない. こうしたことから, 松島(1967)は登熟の良否をより明確に判断するためには, 登熟歩合と1000粒重との積で表した登熟度の方が適切であると述べている. しかし, 収量構成要素の面からみると, 粒重はさらに粒の容積とその比重



第6図 比重1.15以上の粒数割合と精粗比重(S)との関係および登熟開始温度(ΣTs)と比重1.15以上の粒数割合との関係 (2003年).

○: 日本型品種, ●: 多収型品種. *, **: それぞれ5%, 1%水準で有意.

とに分割される. すなわち, 粒重には粒の大きさが影響するため, 粒大に差がある品種間での比較にはこの方法が必ずしも最適とは言えない. したがって, 粒大の影響を取り除いて登熟性を評価する場合, とくに籾によって収量解析を行う場合には, 登熟歩合と精粗比重との積を登熟度とする方がより適切であると思われる. この方法によれば, 粒大の影響が除かれているため, 何割の籾が登熟基準に達したかを示す登熟歩合と基準以上の籾の充実度を表す精粗比重の両面から登熟性を比較することができる. また, この登熟度の持つ具体的意味は, 次のように理解される. 登熟度をRD, 総粒数をN, 精粒数をn, 精粒1粒の容積と重さをそれぞれVおよびWとすると,

$$RD = (n/N) \times (W/V) = (n \times W) / (N \times V)$$

という形に変形される. このうち, $n \times W$ は精粒重 (収量) であり, $N \times V$ は総粒容積 (収量キャパシティ) である. したがって, この式から求めた登熟度は, 収量キャパシティに対する収量の比, すなわち総粒容積当たりの精粒重を表し, 精粒以外の籾も含めた全ての籾についての平均比重 (総粒比重) に近い意味をもつ. そこで, 本試験では登熟歩合と精粗比重との積を登熟度とし, これによって品種の登熟性を評価した. ただし, 登熟歩合は比重1.00以上の粒数割合 (小松ら1984) とした.

本試験に供試した日本型品種と多収性品種の登熟度は, 2003年に有意差は認められなかったものの, 平均値は両年とも日本型品種の方が高かった (第1表). これまでの報告によれば, 半矮性の印度型多収性品種などは登熟性に劣るという指摘 (小松ら1984, 蔣ら1988, 斎藤ら1990a, b) と逆に登熟性に優れるという指摘 (山本ら1991, 楠谷ら1993a) がみられる. しかし, 先の指摘は全体の登熟歩合, 後の指摘は粒比重や枝梗別登熟歩合によって登熟性を比較した結果によるものである. 本試験においても, 両年とも登熟歩合の平均値は日本型品種が高い傾向にあり, 精粗比重の平均値は多収性品種の方が有意に大きかった (第1表). このため, 多収性品種の登熟性は, 登熟歩合からみれば日本型品種よりも劣る傾向にあるが, 精粗比重からみ

れば勝っていると言っていることができる. これらは, 何を基準にするかによって登熟性の評価が逆転することを示すものである.

本試験における品種別の登熟度と登熟歩合との間には強い正の相関関係が存在したが, 精粗比重との間に有意な相関関係は認められなかった (第2表). しかし, 登熟歩合は100%を越えることはないため, 登熟歩合が高く品種間差が少ない条件下では精粗比重が登熟の良否に大きく影響すると考えられる. したがって, 品種の登熟性を評価するにあたって精粗比重を無視することは出来ない. また, 登熟歩合と精粗比重との間に有意な相関関係は認められず (第2表), それぞれを決定する機構は異なるかと推察された. さらに, 2002年と2003年の年次間相関が有意であった (図略) からみて, 登熟歩合および精粗比重はともに安定した遺伝形質であると考えられる (楠谷1988). これらより, 品種の登熟性を正確に把握し, 今後の多収性育種に生かしていくためには, 登熟歩合あるいは精粗比重だけからではなく, その双方についての品種間差を検討することが必要と判断した. そこでまず, 各品種の登熟歩合および精粗比重の差を登熟の温度反応と比重別粒数割合との関係から解析した.

出穂期後の積算気温に対し, 登熟歩合は指数関数的に反応した (第2図). しかし, その指数係数とX切片は品種によって異なっていたので, 指数係数 $\times 10^5$ を登熟係数, X切片を登熟開始温度とし, それぞれの品種間差について検討した. その結果, 登熟係数と登熟歩合との間に正, 登熟開始温度と精粗比重との間に負の有意な相関関係が認められた (第5表). すなわち, 積算気温に対する登熟歩合の上昇が急で登熟速度の速い品種ほど登熟歩合が高く, 登熟が早くから始まる品種ほど精粗比重が大きくなることが判明した. したがって, 登熟開始温度は精粗比重, 登熟係数は登熟歩合を介して品種の登熟性に関わっていると考えられる.

なお, 出穂期後の積算気温が1000°C前後になると, その時の登熟歩合の高低に関わらず, いずれの品種においても

登熟歩合の上昇はほとんどみられなくなった(第2図)。したがって、水稻では積算気温がこの程度になる出穂期後6週間目頃から穂(子実)のシンク機能が低下し、同化産物の受け入れ能力が急激に衰えるのではないかとと思われる。また、積算気温に対する葉色値の低下割合(葉色値低下係数)と登熟係数との間にも有意な負の相関関係が存在し(第5表)、葉の退色が速い品種ほど登熟速度が遅いという傾向がみられた。葉色と個葉光合成能力とは密接な関係にあることが知られている(中沢ら1990、楠谷ら1993b)。このため、出穂期後の葉の老化、すなわち光合成能力の低下の遅速も登熟速度に関係していると推測される。

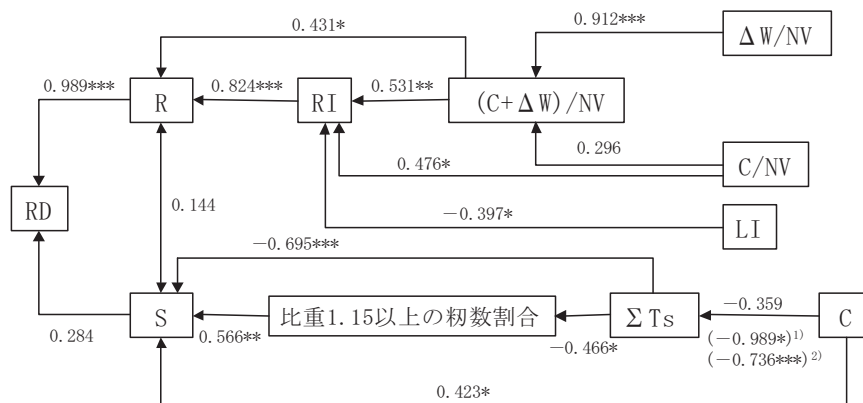
濃度別塩水選によって求めた比重別粒数割合は品種によって異なり(第5図)、比重1.15以上の粒数割合と精粒比重との間に正、登熟開始温度との間に負の有意な相関関係が認められた(第6図)。すなわち、登熟開始温度の低い品種は比重1.15以上の粒数割合が高く、1.15以上の粒数割合が高い品種ほど精粒比重も大きかった。先にも述べたが、登熟歩合の上昇がほとんどみられなくなる時期は品種によって大きく変わらなかったため、登熟開始温度が低い品種ほど登熟期間が長くなる。したがって、早くから登熟が始まる品種は登熟期間が長いために高比重粒の割合が増え、全体の粒比重も大きくなると考えられる。

次に、収量内容物および収量キャパシティと登熟歩合、精粒比重、登熟係数、登熟開始温度との関係についての検討を行った。収量キャパシティの平均値は2002年、2003年とも多収性品種の方が日本型品種よりも有意に大きかった。収量内容物の平均値も多収性品種の方が高かったが、有意な品種群間差は認められなかった。一方、収量内容物/収量キャパシティ比の平均値は、2003年の品種群間差は有意ではなかったものの、両年とも日本型品種が多収性品種を上回っていた(第3表)。また、供試品種全体についてみると、収量内容物/収量キャパシティ比と登熟歩合(第4表)および登熟係数(第3図)との間には有意な正の相関関係が存在し、収量キャパシティ当たりの収量内容物が多い品種ほど登熟速度が速く、このため登熟歩合が高くなると判断された(楠谷1988)。ただし、収量内容物を出穂期までの貯蔵炭水化物量と出穂期後の乾物生産量に分けてみた場合、2003年では登熟歩合、登熟係数とも貯蔵炭水化物量/収量キャパシティとのみ有意な正の相関を示したが(第4表、第3図)、2002年の登熟歩合は出穂期後の乾物生産量/収量キャパシティの方と有意な正の相関関係にあった(第4表)。すなわち、2003年においては、出穂期後の同化産物よりも出穂期までの貯蔵炭水化物の方が登熟に強く影響していた。

精粒比重に関しては、2002年、2003年とも貯蔵炭水化物量との間に有意な正の相関関係が認められた(第4表)。しかし、これらの間に登熟開始温度を置いてみると、先にも述べたように精粒比重と登熟開始温度とは有意な負の相

関を示した(第5表)が、貯蔵炭水化物量と登熟開始温度との間に直接有意な相関関係は成立しなかった(第4図)。しかしながら、貯蔵炭水化物量と登熟開始温度との関係において、回帰する直線が異なっていたヒノヒカリ、KU16、KU31およびホシユタカの4品種と他の品種に分けて相関係数を算出したところ、ともに有意な負の値が得られた。したがって、登熟開始温度は基本的には貯蔵炭水化物に影響され、その量が多いほど登熟の開始が早く、そのため精粒比重が大きくなると推察される。出穂期までに茎葉中に貯蔵された炭水化物は、登熟初期に同化産物の供給が不足するような場合に穎花(果)の退化を防止するとともにその充実を促し、登熟向上に貢献すると指摘されている(和田1969、翁ら1982、角ら1996)が、さらに、本試験の結果から、貯蔵炭水化物は登熟を開始する際の起爆剤のような役目も果たすと考えられた。ただし、貯蔵炭水化物量と登熟開始温度との関係が2群に分離する理由を、本試験の調査範囲内で明らかにすることはできなかった。全体の回帰直線からはずれていた4品種はともに出穂期が8月28日以降の晩生品種であった(第1表)ため、この関係には品種の早晩性がある程度影響していると思われるが、同じ晩生品種であってもコガネマサリと桂朝2号は他の中生および早生品種と同様の反応を示した(第4図)。したがって、貯蔵炭水化物量と登熟開始温度との関係には、早晩性以外の要因、例えば貯蔵炭水化物の転流やその通路である維管束の大きさや数なども関与している可能性がある。しかし、いずれにしてもこれらは推論にすぎないので、今後詳しく検討していかなければならない。

第7図は、2003年の結果をまとめて示したものである。すなわち、登熟歩合と精粒比重の品種間差が決定される道筋は、収量内容物/収量キャパシティ比→登熟係数→登熟歩合、出穂期までの貯蔵炭水化物量→登熟開始温度→比重別粒数割合→精粒比重という経路に整理された。したがって今後は、その始点である収量内容物/収量キャパシティ比の具体的向上策と貯蔵炭水化物の蓄積機構の解明が課題になる。また、それぞれの始点と終点の間には維管束を通じた同化産物の転流が介在する。したがって、その経路には維管束の形態や数も関わっていると推察される。さらに、多収性品種の多くは比重別粒数割合がU字型に分布し、登熟の良い籾は極端に登熟が良く、悪い籾は極端に悪いという傾向が示された。これらは、多収性品種においては強勢籾(穎花)と弱勢籾(穎花)の間に同化産物を巡る極めて激しい競合が存在することを示唆するが、この問題にも維管束が関係しているのではないかとと思われる。維管束と登熟との関係については、これまでも報告(亀島ら1987、笹原・福山1999、新田ら2000)されているが、同化産物の転流を含めて解析した例は少ない。このため、新田ら(2000)が指摘しているように、今後は維管束の形態的差異と同化産物の輸送機能との関係についての検討が必要と考えている。



第7図 登熟度の決定経路 (2003年).

各特性の略表記は、第1表および第3表と同じ。

図中の数字は相関係数。()¹⁾: 第1表の品種番号11, 13, 15および24のみの相関係数。()²⁾: その他の品種の相関係数。

*, **, ***: それぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意。

なお、これらの結果は2002年と2003年ではほとんど変わらなかったが、2003年の出穂期後の乾物生産量が著しく少なかったこと、および登熟歩合との関係が2002年では出穂期後の乾物生産量/収量キャパシティ比、2003年では出穂期までの貯蔵炭水化物量/収量キャパシティ比の方と有意であったことの2点が大きく違っていた。この違いは、両年の気象条件の差にあると推察される。すなわち、2003年の気温と日射量は、7月から8月中旬までは平年以下であり、逆に、8月下旬から9月中旬にかけては平年を大きく上回っていた(第1図)。特に、多くの品種の登熟初期から中期にあたる9月上旬の平均気温は29.0℃で、登熟適温とされる21.5℃(村田1976)より7.5℃も高かった。したがって、登熟初期から中期の異常高温により出穂期後の乾物生産が抑制され、その同化産物だけで収量キャパシティを十分満たすことができなかったために、貯蔵炭水化物の影響が相対的に強くなったと思われる(楠谷1988, 斎藤ら1991, 楠谷ら1993a, 1999, 角ら1996)。しかし、これらについてもさらに年次を重ねての検討を加えていく予定である。

引用文献

- 蔣才忠・平沢正・石原邦 1988. 水稻多収性品種の生理生態的特徴について—アケノホシと日本晴の比較—. 第1報 収量および乾物生産. 日作紀 57: 132–138.
- 亀島雅史・松尾喜義・小松良行 1987. 多収性外国稲の品種生態の解析. 8 超穂重型品種の穂首節間における大維管束数とその大きさ. 日作紀 56 (別2): 55–56.
- 小松良行・金忠男・松尾喜義・片山信浩・片岡孝義 1984. 多収性外国稲の品種生態. 四国農試報 43: 1–37.
- 楠谷彰人 1988. 水稻の冷温登熟性に関する研究. 第3報 登熟に及ぼす出穂後乾物生産の影響. 日作紀 57: 298–304.
- 楠谷彰人・浅沼興一郎・木暮秩 1993a. 水稻における多収性の品種生態に関する研究. 第1報 収量構造の品種間差異. 日作紀 62: 385–

394.

- 楠谷彰人・白石浩司・谷口政謙・三橋健・市原稔久・上田一好・浅沼興一郎 1993b. 水稻における葉色と収量関連特性との関係. 日作四国支紀 30: 62–63.
- 楠谷彰人・上田一好・浅沼興一郎・豊田正範 1999. 水稻における多収性の品種生態に関する研究—ソース・シンク比と収量との関係—. 日作紀 68: 21–28.
- 松島省三 1967. 稲作の理論と技術—収量成立の理論と応用—. 養賢堂, 東京. 1–302.
- 村田吉男 1976. 作物生産と栽培環境. 村田吉男・玖村敦彦・石井龍一 共著, 作物の光合成と生態—作物生産の理論と応用—. 農文協, 東京. 147–196.
- 中沢文男・角田公正・鳥倉弘文 1990. 水稻多収性品種の光合成特性について. 第1報 個葉の光合成速度. 日作紀 59: 72–79.
- 新田洋司・姚友礼・山本由徳・吉田徹志・松田智明・宮崎彰 2000. 水稻の穂首節間を走向する大維管束の種類と数および横断面積の品種間比較. 日作紀 69: 61–68.
- Osada, A., M. Nara, H. Chakrabandhu, M. Rahong and M. Gesprasert 1973. Seasonal Changes in Growth Pattern of Tropical Rice. II. Environmental factors affecting yield and its components. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 42: 351–361.
- 斎藤邦行・下田博之・石原邦 1990a. 水稻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. 水稻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.
- 斎藤邦行・柏木伸哉・木下孝宏・石原邦 1991. 水稻多収性品種の乾物生産特性の解析. 第4報 穂への同化産物の分配. 日作紀 60: 255–263.
- 笹原英樹・福山利範 1999. 日本型イネ品種における穂首維管束系と収量構成要素との関係. 育種学研究 1: 77–81.
- 角明夫・箱山晋・翁仁憲・縣和一・武田友四郎 1996. 水稻の登熟過程における穂重増加を支配する稲体要因の解析. 第2報 穎花の同化産物受容効率に及ぼす出穂期貯蔵炭水化物の役割. 日作紀 65: 214–221.

津野幸人・山口武視・牛見哲也 1990. 登熟抑制処理の水稻にみられる粒重と玄米中のアンモニア濃度との関係. 日作紀 59: 481-493.
 和田源七 1969. 水稻収量成立におよぼす窒素栄養の影響—とくに収穫期以後の窒素の重要性について—. 農技研報 A16: 27-167.
 翁仁憲・武田友四郎・縣和一・箱山晋 1982. 水稻の子実生産に関する物質生産的研究. 第 1 報 出穂期前に貯蔵された炭水化物および

出穂後の乾物生産が子実生産に及ぼす影響. 日作紀 51: 500-509.
 山本由徳・吉田徹志・榎本哲也・吉川義一 1991. 日印交雑稲および半矮性インド稲の籾数生産能率と登熟特性. 日作紀 60: 365-372.
 姚友礼・山本由徳・新田洋司・王余龍・呉華・吉田徹志・宮崎彰・蔡建中 2000. 水稻の籾比重と玄米形質との関係. 日作紀 69: 54-60.

Studies on Varietal Difference of Ripening Ability in Rice —Effects of the Yield Contents and the Yield Capacity on Ripening—: Fumitaka SHIOTSU¹⁾, Jian LIU¹⁾, Masanori TOYOTA²⁾ and Akihito KUSUTANI²⁾ (¹⁾Unit. Grad. Sch. of Agr. Sci., Ehime Univ.; ²⁾Fac. of Agr., Kagawa Univ., Miki, Kagawa 761-0795, Japan)

Abstract: The percentage of ripened grains (R) and specific gravity of winnowed rough rice (S) were compared among 25 rice varieties to analyze the varietal differences of ripening ability. The relationship between the R (Y axis) and the accumulated average air temperature during the ripening period T (X axis) was shown by the following formula:

$$Y = 100 - a \cdot \exp(-b \cdot X)$$

The constant b and the intercept of X axis were different among varieties. The constant $b \times 10^5$ (ripening index, RI) showed a significant positive correlation with R, and the intercept of X axis (starting temperature of ripening, ΣT_s) showed a significant negative correlation with S. Yield content was shown as the sum of reserve carbohydrate (C) and dry matter produced after heading (ΔW), and yield capacity as the product of the number of rough rice (N) and volume of winnowed rough rice (V). Then, the correlation of $(C + \Delta W)/NV$ with RI and ΣT_s was examined. $(C + \Delta W)/NV$ showed a significant positive correlation with RI. The variety with a large C value has a tendency to have a low ΣT_s . These results imply that the cultivar with a high yield content / yield capacity ratio has a higher percentage of ripened grains because its ripening index is high. Also the cultivar with massive reserve carbohydrate was considered to start ripening earlier increasing the specific gravity of winnowed rough rice.

Key words: Paddy rice, Percentage of ripened grains, Ripening ability, Specific gravity of winnowed rough rice, Varietal difference, Yield capacity, Yield contents.