

## 高温が水稻の登熟に及ぼす影響

—人工気象室における温度処理実験による解析—

森田敏\*

(中国農業試験場)

**要旨:** ポット栽培水稻を用いて人工気象室による温度処理実験を行い、中国地方平坦部の福山市における平年的な8月の気温が登熟に及ぼす影響を解析した。人工気象室で登熟期に福山平年区 (32°C/23°C; 最高/最低気温)、低温区 (28°C/19°C) および高温区 (35°C/26°C) の3区を設けた。玄米1粒重と良質粒歩合は低温区に比べて福山平年区で有意に低下し、高温区ではさらに低下した。高温による玄米1粒重の低下は粒厚の減少を伴った。また、高温による玄米1粒重の低下は全ての節位の1次枝梗で生じた。福山平年区では低温区より発育停止粒歩合が高く、高温区では不稔歩合が著しく高かった。高温による玄米1粒重の低下程度には品種間差異が認められ、高温区の粒重が低温区のそれより10%以上低下した品種は、森田早生、大粒のジャワ型品種の Arborio、極穂重型で登熟不良となりやすい日本型品種アケノホシなどであった。高温区での粒重低下程度が5%未満であった品種は、環境による品質の振れが小さいと言われるコガネマサリ、小粒のジャワ型品種の Lakhi Jhota、アケノホシと兄弟であり極穂重型で登熟が良いインド型品種のホシユタカであった。

**キーワード:** 玄米品質, 高温, 人工気象室, 水稻, 着粒位置, 登熟, 品種間差異, 粒重。

水稻の登熟期の適温は20°Cから25°Cの間にある(松島・真中 1957, 村田 1964, 棟方ら 1967, Sato and Takahashi 1971, Yoshida and Hara 1977, Chowdhury and Wardlaw 1978, 伊藤 1979, Tashiro and Wardlaw 1991 a)。中国地方の標高の低い平坦部では、7月から8月中旬の間に収穫した場合、登熟気温が平年値で25°C以上となる地域が多い。例えば山陽地域にある福山市では8月中旬の日平均気温の平年値は27.4°C、山陰地域にある鳥取市では同じく27.1°Cである。なお、日本で最も暑い地域である沖縄の7月の場合、28.3°Cである。したがって登熟適温の見地に立つと、このような地域的水稻では高温により常習的に登熟が悪影響を受けている可能性がある。しかし、中国地方平坦部での平年的な登熟気温を人工気象室で再現し、その温度が登熟に及ぼす影響を解析した研究は見あたらない。

そこで本研究では、人工気象室で設定した福山市の平年的な8月の気温、登熟適温とされるこれより4°C低い気温および将来予測されるこれより3°C高い気温(Hansenら 1984)が登熟に及ぼす影響を詳細に解析した。なお、高温が登熟に及ぼす影響の程度には品種間差異が認められている(長戸ら 1961, 岩下ら 1973, 佐々木ら 1983)ので、コシヒカリなどの普及品種と大粒や小粒の品種、極穂重型品種等を用いて、将来予想される高温による玄米1粒重の低下程度の品種間差異についても解析した。

### 材料と方法

**実験1. 人工気象室で設定した福山市の8月の平年気温、これより低温および高温の温度処理が登熟に及ぼす影響**

1990年に水稻品種日本晴を用い、水田土壌(細粒質灰

色低地土)を詰めた1/5000 aワグネルポットで土耕栽培した。育苗箱当たり100g(乾粒換算)の催芽粒を播種し、30日間育てた苗を6月21日にポット当たり2株(2本/株)移植した。ポットは、中国農業試験場(広島県福山市)内のコンクリート排水槽内に東西方向、南北方向とも10cmの間隔で置いた。基肥として、窒素、リン酸、カリウムが各16%の化成肥料を、ポット当たり1.25g与えた。追肥として、窒素、リン酸が各17%の化成肥料を、7月13日(出穂前39日)、25日(出穂前27日)、8月8日(出穂前13日)に、それぞれ1.0g、1.5g、1.8g与えた。

供試穂の先端穎花の開花日(8月21日および22日)の翌日18:00頃から、ポットを人工気象室(自然光室)に移動し、40日間温度処理を行った。供試穂では処理開始日に穂長の約半分が止葉葉耳より抽出していた。温度処理の日変化は最低気温を5:00、最高気温を14:00とする修正sine曲線(MS—curve)(和田 1980)により設定した(第1図)。これは、気温の日変化を表すモデルで、

$$x = (B - A) \sin^2(\pi t / 2H) + A + k(B - A)(\pi t / H),$$

$$(|k| \leq 1/4) \dots\dots\dots (式1)$$

で表わされる。ここで、xは気温、tは時刻、Aは日最低気温、Bは日最高気温、HはAB間の時間、kはsine曲線に対する修正係数を表わす。和田(1980)に従い、1日の気温変化を最低気温Aから最高気温Bまで上昇する部分と、最高気温Bから翌日の最低気温Aまで低下する部分の、二つのモデルで表わした。本実験では和田(1980)の分析結果を参考に、修正係数kを前者のモデルで0.05、後者で-0.15とした。日最高気温32°C、日最低気温23°Cの福山平年区は、福山市における8月における月平均日最高気温と月平均日最低気温の平年値(1961年~1990

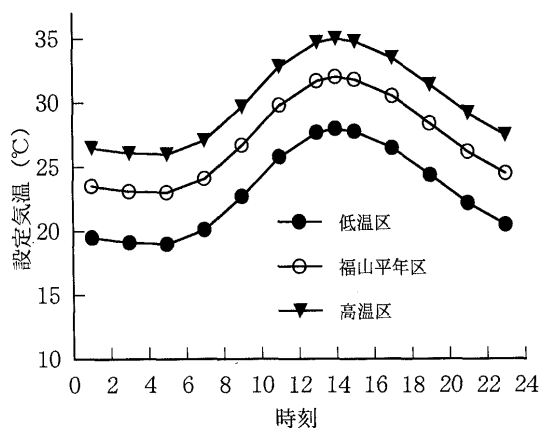
年) がそれぞれ 32.1℃ と 23.0℃ であったことから設定した。福山平年区より最高気温、最低気温ともに 3℃ 高くした試験区を高温区、4℃ 低くした試験区を低温区とした。また穂の先端穎花の開花後 1 日目 (開花日の翌日) 18:00~5 日目 18:00, 同様に 7~11 日目, 13~17 日目の各 4 日間に高温区の温度処理を行い, 他の期間は福山平年区の温度処理を行った区を各々 1—5 高温区, 7—11 高温区, 13—17 高温区とした。

人工気象室内の日射量は, 開花後 20 日間の日平均値で 13.7 MJ/m<sup>2</sup>, 開花後 40 日間で 10.2 MJ/m<sup>2</sup> であった。

1 試験区当たり 4 ポットを用い, 各ポットから開花日および穂の大きさの揃った 5 穂を供試した。

人工気象室での温度処理終了後, 直ちに供試穂を穂首直下から切り取り, 40℃ で 48 時間以上通風乾燥後, 各穂の粒数を数え, 着生している 1 次枝梗別に粒数と粒重を測定した。子房が膨らんでいない粒は不稔粒として数えた。玄米は段篩いで 0.1 mm 間隔の粒厚別に分け, 粒数および粒重を測定した。このときの玄米水分は試験区によりほとんど差がなかった (約 9.4%)。

登熟粒とみなした粒厚 1.7 mm 以上の玄米について品質判定機 (静岡精器, RS-1000) で外観品質別粒数歩合を測定した。この判定機は, ハロゲン光源から光ファイバーで導かれた光を玄米に 1 粒ずつ照射して, その透過率 (反射光量に対する透過光量の比率) と反射光の分光比 (緑色光量に対する赤色光量の比率) を測定することにより, 良質粒, 未熟粒, 被害粒, 死米および着色粒の 5 つに分類する (第 2 図)。本実験では, 目視による観察を参考にして



第 1 図 各試験区で設定した気温の日変化。

日変化は, 最低気温を 5:00, 最高気温を 14:00 とする修正 sine 曲線 (MS-curve) (和田 1980) により設定した。モデル式は本文の式 1) 参照。

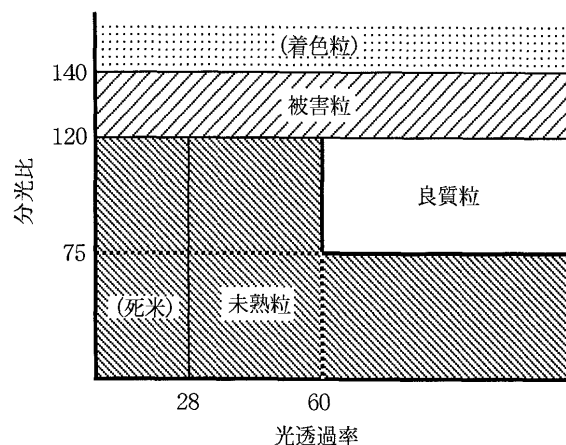
通常より良質粒の判定枠が広くなるように境界値を設定した。着色粒は被害粒に含め, また死米は未熟粒に含めて解析した。1 反復に用いた玄米は約 300 粒であった。

出穂期にポット内の穂数, 成熟期に供試した茎の草丈をそれぞれ測定した。

## 実験 2. 高温登熟性の品種間差異

1991 年に水稻品種キヌヒカリ, 森田早生, コシヒカリ, Arborio, 中生新千本, アケノホシ, ヒノヒカリ, コガネマサリ, Lakhi Jhota およびホシユタカを用い, 実験 1 とほぼ同様の方法で土耕栽培した。供試品種のうち, Arborio と Lakhi Jhota はそれぞれイタリアとバングラディッシュで育成されたジャワ型品種であり, アケノホシとホシユタカはそれぞれ日本型とインド型の極穂重型品種で, ともに中国農試で育成された。移植日はキヌヒカリで 5 月 9 日, 中生新千本で 6 月 4 日, その他の品種で 6 月 18 日とした。基肥は, 窒素, リン酸, カリウムが各 14% の緩効性被覆尿素肥料 (140 日タイプ) を, ポット当たり 10 g 与えた。キヌヒカリと中生新千本では追肥として出穂前 20 日頃 (前者で 7 月 7 日, 後者で 8 月 1 日) に窒素, リン酸が各 17% の化成肥料を 1.8 g 与えた。第 1 表に供試各品種の開花日 (供試穂の先端穎花が開花した日) と成熟日を示した。

開花日の 4 日後から人工気象室内で実験 1 の低温区と高



第 2 図 品質判定機の品質分類基準。

静岡精器 (株), RS-1000 を用いた。分光比は玄米の反射光の赤色光量/緑色光量×100, 光透過率は透過光量/反射光量×100 で表示。本実験では目視による品質判定結果を参考に良質粒の判定枠を通常より広くした。死米は未熟粒に, 着色粒は被害粒にそれぞれ含めた。

第 1 表 供試各品種の開花日と成熟日。

	キヌヒカリ	森田早生	コシヒカリ	Arborio	中生新千本	アケノホシ	ヒノヒカリ	コガネマサリ	Lakhi Jhota	ホシユタカ
開花日 <sup>1)</sup>	7月27日	8月8日	8月15日	8月16日	8月21日	8月26日	8月27日	8月28日	8月30日	9月5日
成熟日 <sup>2)</sup>	9月5日	9月20日	9月24日	9月24日	10月3日	10月7日	10月9日	10月10日	10月12日	10月18日

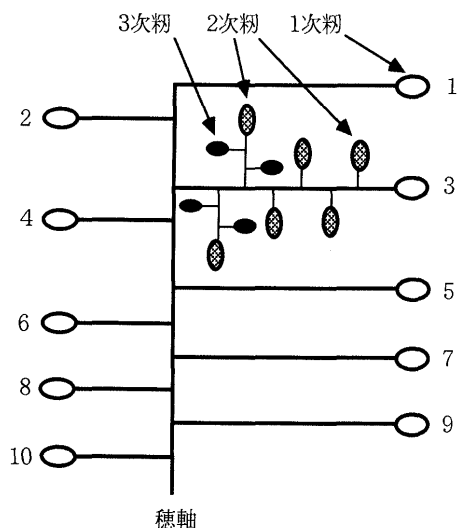
1) 採取穂の先端穎花の開花日。2) 処理開始 (開花後 4 日目) 後 35~39 日目。

温区と同様の温度処理を行った。供試穂では処理開始の前日に止葉葉耳から完全に穂が抽出していた。1試験区あたり2ポット、各ポットから開花日および穂の大きさの揃った5~10穂を供試し、実験1とほぼ同様の調査を行った。ただし、玄米1粒重の測定は1次枝梗別ではなく、着粒位置により1, 2次籾と3次籾に分けて調査した(第3図)。この分類方法は、穂の形成過程を反映した小穂の類別(松葉 1991)に基づいている。また、玄米の外観品質の調査はキヌヒカリと中生新千本についてのみ行った。

## 結 果

### 1. 人工気象室で設定した福山市の8月の平年気温と、これより低温および高温の温度処理が登熟に及ぼす影響(実験1)

穂数、1穂粒数および1次枝梗数は試験区によって差が

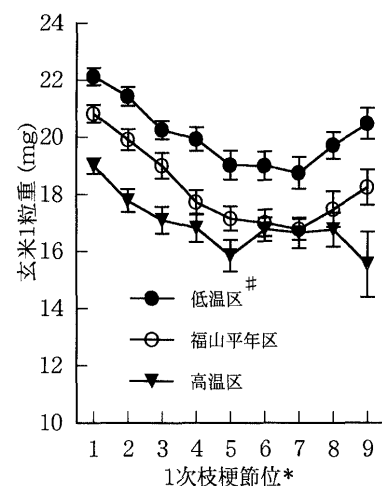


第3図 穂内の着粒位置による籾の分類方法。

松葉(1991)に基づいて、穂軸からの枝分かれの回数に対応した次数を籾に与えることにより分類した。図では1次枝梗10本の穂を例示しており、上から3本目の1次枝梗でのみ2, 3次籾を示した。

認められなかった(第2表)。福山平年区では低温区に比べて玄米1粒重が有意に小さく、その差は全玄米平均で約2mg、粒厚1.9mm以上の玄米で約1mgであった。高温区では福山平年区より1.9mm以上の玄米1粒重が2mg小さく、全玄米平均の1粒重も小さい傾向が認められた。1次枝梗別にみた玄米1粒重は、福山平年区ではいずれの節位でも低温区より小さく、その差は穂の下部で上部よりやや大きい傾向が見られた(第4図)。一方、高温区では福山平年区に比べて玄米1粒重が穂の上部で約2mg小さく、上から6, 7, 8本目の1次枝梗で両区間の差が小さかった。

時期別に高温処理を行った区についてみると、1~5高温区では福山平年区より全玄米平均の1粒重が有意に大きかったが、7~11高温区および13~17高温区では玄米1粒重が福山平年区とほぼ同等であった(第2表)。また、1~5高温区と福山平年区の玄米1粒重の差は、穂の下部の1次枝梗で大きい傾向が認められた(第5図)。7~11高温



第4図 低温区、福山平年区および高温区における1次枝梗節位別の玄米1粒重。

\*: 穂内の上から順の節位。#: 第1図参照。シンボルの上下の縦線は標準誤差を示す。

第2表 各試験区の玄米1粒重、穂数、1穂粒数および1次枝梗数。

試験区	処理温度(℃) <sup>1)</sup>	玄米1粒重(mg)		穂数 (本/ポット)	1穂粒数	1次枝梗数
		全玄米	粒厚1.9mm以上			
低温区	28/19	19.8 ± 0.4 *	21.5 ± 0.1 *	28.0 ± 0.9	84.1 ± 2.6	8.8 ± 0.4
福山平年区	32/23	18.0 ± 0.5	20.8 ± 0.2	27.3 ± 1.4	84.1 ± 2.8	8.4 ± 0.1
高温区	35/26	17.1 ± 0.6	18.8 ± 0.3 *	27.8 ± 0.3	84.9 ± 1.2	8.8 ± 0.0
1-5高温区	(35/26)	20.0 ± 0.6 *	20.9 ± 0.3	26.5 ± 1.9	86.8 ± 3.4	9.2 ± 0.2
7-11高温区	(35/26)	18.1 ± 0.4	20.6 ± 0.1	28.3 ± 0.9	88.2 ± 2.9	8.6 ± 0.0
13-17高温区	(35/26)	18.0 ± 0.6	20.8 ± 0.1	27.8 ± 0.8	84.0 ± 4.0	8.8 ± 0.3
LSD(0.05)		1.6	0.6	ns	ns	ns

1) 日最高温度と日最低温度を示した(第1図参照)。1~5高温区、7~11高温区、13~17高温区はそれぞれ開花後1~5日目、7~11日目、13~17日目に35℃/26℃、それ以外の日は32℃/23℃とした。2) 平均値±標準誤差。\*は福山平年区に比べて5%水準で有意差があることを示す。

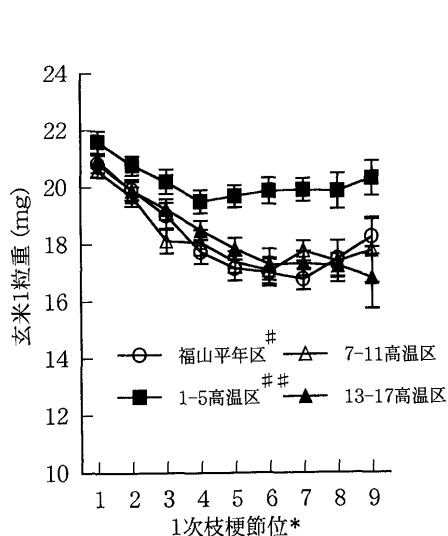
区と13—17高温区ではいずれの節位の1次枝梗でも福山平年区と大差がなかった。

登熟歩合は低温区、福山平年区、高温区の順に高い傾向が見られたが、有意差は認められなかった(第3表)。時期別高温処理を行った区における登熟歩合は、いずれも福山平年区と同じ73%であった。本実験では登熟に達しなかった籾を不稔籾と発育停止籾に分けて解析したが、高温区と1—5高温区では福山平年区に比べて不稔歩合がいずれも有意に高く(第3表)、特に穂の下部の1次枝梗で不稔が発生していた(第6図)。一方、発育停止籾歩合は福山平年区が約17%と最も高く、高温区で約11%、1—5高温区ではさらに低かった(第3表)。

玄米の外観品質についてみると、福山平年区では低温区

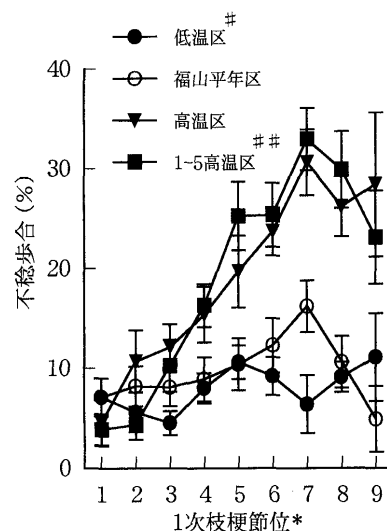
に比べて良質粒歩合が約16%低下し、これに伴い未熟粒歩合が上昇した。高温区では福山平年区に比べて良質粒歩合が約50%低下し、これに伴い未熟粒歩合が約36%、被害粒歩合が約13%上昇した。なお、福山平年区や高温区で認められた未熟粒は主に乳白米であり、基白米や背白米も観察された。7—11高温区および13—17高温区では福山平年区より良質粒歩合が低く、後者では特に高温区と同程度に被害粒歩合が高かった。

玄米の粒厚分布をみると(第7図)、低温区では福山平年区より粒厚1.7mm未満の玄米が少なく、1.9mm～2.1mmの玄米が多かった。これに対して高温区では福山平年区より粒厚1.7～1.9mmの玄米が多く、粒厚2.0mm～2.1mmの玄米が少なかった。



第5図 1—5高温区、7—11高温区、13—17高温区および福山平年区における1次枝梗節位別の玄米1粒重。

\*: 穂内の上から順の節位。#: 第1図参照。##: 第2表参照。シンボルの上下の縦線は標準誤差を示す。



第6図 低温区、福山平年区、高温区および1—5高温区における1次枝梗節位別の不稔歩合。

\*: 穂内の上から順の節位。#: 第1図参照。##: 第2表参照。シンボルの上下の縦線は標準誤差を示す。

第3表 各試験区における不稔歩合、発育停止籾歩合、登熟歩合および品質別粒数歩合。

試験区	処理温度(℃) <sup>1)</sup>	不稔歩合 <sup>2)</sup> (%)	発育停止籾歩合 <sup>3)</sup> (%)	登熟歩合 <sup>4)</sup> (%)	品質別粒数歩合 <sup>5)</sup>		
					良質粒歩合(%)	未熟粒歩合(%)	被害粒歩合(%)
低温区	28/19	7.2 ± 0.8 <sup>6)</sup>	9.6 ± 2.1	83.2 ± 2.4	86.3 ± 1.5 **	11.1 ± 1.5 **	2.6 ± 1.0
福山平年区	32/23	10.1 ± 2.1	16.6 ± 2.0	73.3 ± 3.5	70.0 ± 3.4	27.3 ± 3.1	2.7 ± 2.4
高温区	35/26	19.9 ± 1.9 **	10.5 ± 4.9	69.6 ± 5.5	20.2 ± 3.6 **	63.7 ± 4.1 **	16.1 ± 1.3 **
1-5高温区	(35/26)	21.3 ± 2.3 **	5.6 ± 2.2 *	73.0 ± 4.5	66.7 ± 2.3	26.7 ± 0.8	6.6 ± 1.2
7-11高温区	(35/26)	13.4 ± 2.2	13.9 ± 2.7	72.8 ± 4.8	59.6 ± 2.8 *	32.0 ± 2.5	8.4 ± 1.8 *
13-17高温区	(35/26)	12.2 ± 2.9	15.1 ± 2.6	72.7 ± 5.0	58.4 ± 3.0 **	27.2 ± 0.6	14.5 ± 1.3 **
LSD(0.05)		6.3	8.7	ns	8.5	7.2	4.4
LSD(0.01)		8.7	12.0	ns	11.6	9.9	6.0

1) 第2表と同様。2) 不稔籾数/全籾数。不稔籾は子房のままで膨らんでいない籾とした。稔実籾とみなした玄米1粒重の最低値は0.8mgであった。3) 発育停止籾数/全籾数。発育停止籾は、玄米の粒厚が1.7mmに達していない稔実籾とした。4) 登熟籾数/全籾数。登熟籾は玄米の粒厚1.7mm以上の籾とした。5) 登熟籾を対象に、品質判定機(静岡精器(株)、RS-1000)で測定した。各品質の判定方法は第2図および本文を参照。6) 平均値±標準誤差。\*, \*\* はそれぞれ福山平年区に比べて5%水準と1%水準で有意差があることを示す。

## 2. 高温登熟性の品種間差異 (実験 2)

供試各品種の草丈、穂数、1穂粒数、1次枝梗数および全粒数に対する3次粒数の割合を第4表に示した。Lakhi Jhotaは草丈が高く、穂数が少なく、1穂粒数が258粒と、他の品種と草型が大きく異なった。1穂粒数は、このほかにアケノホシで142粒と多く、最も少なかったのは中生新千本の73粒であった。弱勢穎果である3次粒の数が全粒数に占める割合は、Lakhi Jhotaが55%と際立って高く、次いでアケノホシが42%と高かった。その他の品種では23%~28%の範囲にあった。

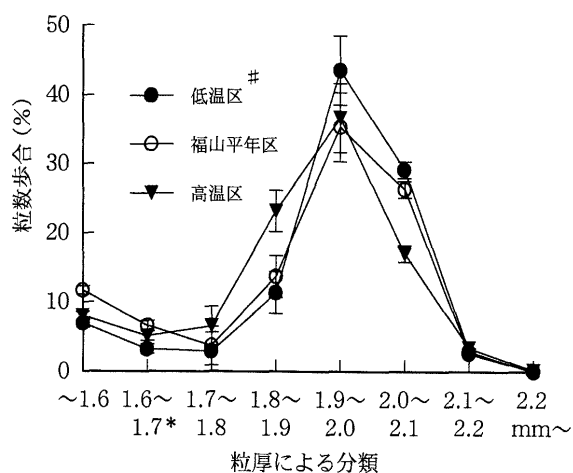
玄米1粒重はいずれの品種においても高温下で小さい傾向を示したが、コガネマサリ、Lakhi Jhotaおよびホシユタカでは有意差は認められなかった(第5表)。高温処理による玄米1粒重の低下程度は、森田早生とヒノヒカリ

では1, 2次粒より3次粒で大きかったが、他の品種では両者間に大きな差異はなく、Arborioではむしろ1, 2次粒の低下程度が大きかった。不稔歩合は、コシヒカリ、Arborio、ヒノヒカリおよびコガネマサリでは高温処理の影響が認められなかったが、他の品種では高温区で高かった。なお、有意な差ではなかったが、ヒノヒカリではむしろ高温区より低温区で不稔歩合が高まる傾向が見られた。1茎あたり地上部重はLakhi Jhotaで大きく森田早生で小さかったが、高温区・低温区間では有意差が認められなかった。

キヌヒカリと中生新千本の良質粒歩合は、1, 2次粒と3次粒のいずれにおいても高温区では低温区に比べて大きく低下し、その低下程度(低温区-高温区の値)はいずれの着粒位置でもキヌヒカリで約60%、中生新千本で約50%であった(第6表)。なお、高温による良質粒歩合の低下は未熟粒歩合と被害粒歩合の増加を伴っていたが、3次粒では1, 2次粒より被害粒の増加程度が大きかった。

## 考 察

水稻の登熟は過高温により悪影響を受けることがこれまでに多数報告されており、影響が現れる局面は受精障害による不稔歩合の増加(Osadaら1973, Satake and Yoshida 1978)、登熟歩合の低下(松島・真中1957)、玄米1粒重の減少(山本1952, 松島・真中1957, 長戸・江幡1960, Sato and Takahashi 1971, Yoshida and Hara 1977, Tashiro and Wardlaw 1991 a)、玄米の外観品質の低下(山本1952, 長戸・江幡1960, Yoshida and Hara 1977, Tashiro and Wardlaw 1991 b)、と様々である。本研究では、これらの視点から、中国地方平坦部にある福山市における8月の平均気温が登熟に及ぼす影響を人工気象室での温度処理実験により詳細に解析した。その結果、人工気象室で設定した福山市の8月における日平均平均気温



第7図 低温区、福山平年区および高温区における玄米の粒厚分布。

\*: 粒厚1.6 mm以上1.7 mm未満の玄米。他の分類も同様。#: 第1図参照。シンボルの上下の縦線は標準誤差を示す。

第4表 供試各品種の草丈、穂数、1穂粒数、1次枝梗数および3次粒数/全粒数比率。

品種 <sup>1)</sup>	草丈 (cm)	穂数 (本/株)	1穂粒数	1次枝梗数	3次粒数 / 全粒数 (%)
キヌヒカリ	95.2 ± 0.2 <sup>2)</sup>	41.5 ± 3.4	107.6 ± 1.8	11.0 ± 0.2	27.4 ± 0.9
森田早生	79.8 ± 1.7	35.0 ± 0.7	77.0 ± 2.2	7.9 ± 0.1	26.4 ± 1.3
コシヒカリ	84.6 ± 1.7	42.5 ± 1.0	99.0 ± 10.1	9.3 ± 0.2	23.6 ± 2.4
Arborio	89.6 ± 1.4	22.8 ± 1.9	89.7 ± 3.4	9.6 ± 0.2	25.8 ± 1.9
中生新千本	81.0 ± 0.1	34.5 ± 7.3	72.6 ± 4.8	7.1 ± 0.1	27.5 ± 0.5
アケノホシ	79.1 ± 2.1	22.8 ± 2.1	141.6 ± 5.3	10.0 ± 0.2	41.8 ± 1.2
ヒノヒカリ	84.1 ± 1.7	28.8 ± 1.4	92.9 ± 2.1	10.1 ± 0.1	20.9 ± 0.9
コガネマサリ	82.8 ± 1.4	27.0 ± 1.1	84.6 ± 4.7	9.8 ± 0.2	26.8 ± 1.3
Lakhi Jhota	131.3 ± 0.8	21.0 ± 1.9	257.8 ± 10.0	11.7 ± 0.5	54.6 ± 2.7
ホシユタカ	78.2 ± 1.5	25.5 ± 2.3	102.4 ± 2.7	11.0 ± 0.3	26.1 ± 1.6

1) 移植日はキヌヒカリで5月9日、中生新千本で6月4日、その他の品種で6月18日。開花日は第1表を参照。キヌヒカリと中生新千本は出穂前20日頃に追肥(本文参照)を行ったが、その他の品種では行わなかった。2) 平均値±標準誤差。3) \*第3図参照。

第5表 供試各品種の玄米1粒重, 不稔歩合および1茎あたり地上部重.

品種	平均日射量 <sup>1)</sup> (MJ/m <sup>2</sup> /day)	試験区 <sup>2)</sup>	玄米1粒重 (mg)			不稔歩合 (%)	1茎あたり 地上部重 (g)
			全玄米 <sup>3)</sup>	1,2次籾 <sup>4)</sup>	3次籾		
キヌヒカリ	15.0	高温区	20.8 ± 0.0 ** (89.9)	21.4 ± 0.1 ** (89.4)	19.3 ± 0.0 * (91.1)	6.8 ± 1.1 *	4.17 ± 0.07
		低温区	23.1 ± 0.2	23.9 ± 0.2	21.1 ± 0.1	3.8 ± 0.4	4.66 ± 0.22
森田早生	13.9	高温区	18.6 ± 0.1 ** (83.3)	19.7 ± 0.2 ** (85.0)	15.1 ± 0.8 ** (76.0)	12.6 ± 1.5 **	2.31 ± 0.08
		低温区	22.3 ± 0.3	23.2 ± 0.2	19.8 ± 0.9	6.7 ± 0.8	2.28 ± 0.00
コシヒカリ	13.0	高温区	19.5 ± 0.2 ** (90.9)	20.3 ± 0.4 ** (91.4)	16.7 ± 0.7 ** (87.0)	8.6 ± 1.5	2.59 ± 0.06
		低温区	21.5 ± 0.1	22.3 ± 0.1	19.2 ± 0.1	8.7 ± 1.6	2.71 ± 0.10
Arborio	12.8	高温区	28.1 ± 0.1 ** (85.0)	29.5 ± 0.1 ** (84.4)	23.0 ± 0.5 * (93.6)	13.7 ± 3.1	4.03 ± 0.94
		低温区	33.1 ± 1.2	34.9 ± 1.5	24.6 ± 1.2	12.8 ± 1.5	3.35 ± 0.21
中生新千本	13.0	高温区	21.8 ± 0.4 * (93.3)	22.4 ± 0.5 * (93.5)	20.2 ± 0.1 * (91.8)	5.6 ± 1.1 *	4.40 ± 0.32
		低温区	23.4 ± 0.7	24.0 ± 0.7	22.0 ± 0.7	3.0 ± 0.4	4.34 ± 0.46
アケノホシ	11.6	高温区	17.7 ± 0.4 ** (87.9)	18.6 ± 0.4 ** (88.3)	16.1 ± 0.7 ** (85.0)	30.5 ± 1.7 *	4.61 ± 0.23
		低温区	20.1 ± 0.3	21.1 ± 0.7	18.9 ± 0.2	24.1 ± 2.3	4.54 ± 0.31
ヒノヒカリ	11.8	高温区	18.8 ± 0.0 ** (92.1)	19.7 ± 0.2 (93.5)	15.3 ± 0.3 ** (86.1)	12.1 ± 1.9	3.94 ± 0.20
		低温区	20.4 ± 0.3	21.1 ± 0.3	17.7 ± 0.0	14.2 ± 2.5	3.63 ± 0.54
コガネマサリ	11.8	高温区	18.8 ± 0.5 (95.7)	19.4 ± 0.5 (96.0)	16.8 ± 0.4 (96.2)	12.1 ± 1.2	3.61 ± 0.01
		低温区	19.6 ± 0.2	20.2 ± 0.2	17.5 ± 0.1	12.4 ± 1.6	3.23 ± 0.05
Lakhi Jhota	11.8	高温区	11.0 ± 0.3 (98.3)	11.3 ± 0.1 (98.4)	10.7 ± 0.3 (98.4)	15.9 ± 1.6 *	5.77 ± 0.00
		低温区	11.2 ± 0.1	11.5 ± 0.0	10.9 ± 0.2	10.6 ± 0.9	5.28 ± 0.00
ホシユタカ	10.2	高温区	17.0 ± 0.0 (95.4)	17.6 ± 0.1 (95.3)	15.1 ± 0.1 (94.0)	10.6 ± 2.0 *	3.93 ± 0.49
		低温区	17.8 ± 0.0	18.5 ± 0.0	16.1 ± 0.0	5.0 ± 0.7	3.61 ± 0.5
LSD(0.05)			1.1	1.4	1.5	7.8	ns
LSD(0.01)			1.6	1.9	2.0	ns	ns

1) 処理開始後20日間の平均日射量. 2) 第1図参照. 3) 平均値±標準誤差を示す. 4) ( )内の数字は対低温区比 (%)を示す. \*, \*\*は, 低温区に比較して5%水準と1%水準でそれぞれ有意差があることを示す. ただし, 不稔歩合は各穂を反復とするt検定を行った.

第6表 各試験区の玄米外観品質.

品種	試験区 <sup>1)</sup>	1,2次籾 <sup>2)</sup>			3次籾 <sup>2)</sup>		
		良質粒 (%)	未熟粒 (%)	被害粒 (%)	良質粒 (%)	未熟粒 (%)	被害粒 (%)
キヌヒカリ	高温区	20.4 ± 0.0 <sup>3)</sup>	72.4 ± 0.0	7.2 ± 0.0	4.7 ± 0.0	73.0 ± 0.0	22.3 ± 0.0
	低温区	78.8 ± 0.2	18.0 ± 1.6	3.2 ± 1.4	67.0 ± 1.6	29.6 ± 0.2	3.4 ± 1.4
	高温区-低温区間	**	**	**	**	**	**
中生新千本	高温区	6.5 ± 0.8	77.8 ± 0.9	15.8 ± 1.6	1.1 ± 0.0	64.2 ± 1.0	34.8 ± 1.0
	低温区	57.3 ± 6.4	41.0 ± 8.1	1.8 ± 1.8	50.4 ± 8.7	46.6 ± 11.8	3.1 ± 3.1
	高温区-低温区間	**	**	**	**	**	**

1) 第1図参照. 2) 第3図参照. 3) 平均値±標準誤差. 玄米の粒厚が1.7 mm以上の玄米を調査対象とした. \*, \*\* は, それぞれ5%水準と1%水準で有意差があることを示す.

27.5℃ (最高32℃/最低23℃) を40日間与えた場合, これより4℃低い気温である23.5℃ (最高28℃/最低19℃) を与えた場合と比較し, 玄米1粒重および玄米の外観品質が有意に低下することが明らかになった. この結果は, 20℃から25℃の間に登熟適温を認めたこれまでの報告に合致した (松島・真中 1957, 村田 1964, 棟方ら 1967, Sato and Takahashi 1971, Yoshida and Hara 1977, Chowdhury and Wardlaw 1978, 伊藤 1979, Ta-

shiro and Wardlaw 1991 a). さらに, 将来予想される, 平年気温より3℃高い (Hansenら 1984) 温度条件 (最高35℃/最低26℃) では, 玄米1粒重と外観品質はさらに低下することを認めた. また, 粒厚分布の検討結果から, 高温による玄米1粒重の減少は粒厚の減少を伴うことが認められた. この点は, 山本 (1952), 長戸・江幡 (1960) および Tashiro and Wardlaw (1991 b) の報告と一致した. 実験1では, 登熟に達しなかった籾を, 受精しなかった

不稔籾（本実験では子房が肥大しなかった籾）と受精したものの登熟前に穎果が发育停止した籾に分けて解析した。その結果、发育停止籾歩合は福山平年区で高くなり、不稔歩合は高温区で著しく高くなった。1—5 高温区においても同様に不稔歩合が高く、高温区では開花期の高温による受精障害が発生したと考えられた。したがって本実験の結果は、穎果の发育停止を生じさせる高温が、受精障害を生じさせる高温よりも低いことを示唆している。Satake and Yoshida (1978) は、受精障害が発生する高温限界には明らかな品種間差異があることを認めており、感受性中程度の品種で 35—37℃としている。最高気温が 35℃であった高温区で不稔が多発した日本晴は、この中程度に分類されると見られた。

次に、高温区および 1—5 高温区の发育停止籾歩合が福山平年区のそれよりむしろ低くなった原因について考察したい。佐藤ら (1973) は、開花期のみを高温にして不稔が生じた試験区では、対照区より玄米 1 粒重が大きかったことを認めており、これは、稔実粒数が少なくなったものの炭水化物の供給が維持されたことによると推察した。1—5 高温区の玄米 1 粒重は福山平年区のそれより有意に高く、佐藤らの実験結果を再確認したが、本実験ではさらに 1—5 高温区の发育停止籾歩合が有意に低下したことを認めた。このことから、1—5 高温区と高温区において、不稔歩合の上昇による 1 粒あたりの炭水化物供給量の増加は、发育停止籾歩合も小さくすることに作用することが推察された。

以上のように福山平年区では发育停止籾歩合が上昇し、高温区では不稔歩合が著しく上昇することにより、高温になるほど登熟歩合が低下する傾向が見られた。しかし、各試験区間で登熟歩合に有意差は認められなかった。登熟歩合に対する高温の影響が玄米 1 粒重に対するそれと比べて不明瞭となることは、Sato and Takahashi (1971) および Yoshida and Hara (1977) の報告からも示唆される。これらの実験で登熟歩合に高温の影響が小さかったのは、一つには開花終了後に高温処理を開始しており、高温不稔の発生がなかったことが考えられるが、それとともに、開花期を過ぎてからの高温は、登熟歩合（この場合、发育停止籾歩合にほぼ一致する）の低下には強く作用しないとみることができる。一方、この時期の高温は玄米 1 粒重の低下をもたらしたことから、登熟に達した（一定の大きさを越えた）後の穎果の发育抑制には強く作用すると考えられる。この点については、今後さらに検討する予定である。

高温区における最高気温 35℃は福山でも高温年に 2—4 日発生するため、かかる高温が登熟に及ぼす影響を時期別に検討した。その結果、開花後 7—11 日目および開花後 13—17 日目の各 4 日間の高温が、玄米 1 粒重に与える影響は認められなかった。一方、佐藤ら (1973) は 7 日間の高（昼 35℃/夜 30℃）が開花後 6—16 日目に与えられた場合、その前後の時期に与えられた場合よりも玄米 1 粒

重の低下程度が大きいことを認め、Tashiro and Wardlaw (1991 a) は開花後 12—20 日目の 8 日間の高（昼 36℃/夜 31℃）が最も玄米 1 粒重を低下させることを報告している。以上のように、4 日間の高の玄米 1 粒重に及ぼす影響がこれまでの報告と一致しない原因は、高温処理期間の長さや高温（最高 35℃/最低 26℃）のレベルなどの違いが挙げられる。

本研究では、高温による玄米 1 粒重の低下程度が着粒位置によって異なるのか否かを検討した。日本晴を用いた実験 1 において、福山平年区ではどの節位の 1 次枝梗でも低温区より玄米 1 粒重が低下することが認められたが、その低下程度は上位より下位でやや大きかった。高温区では上から 6, 7, 8 本目の 1 次枝梗で福山平年区と差が小さくなったが、その他の 1 次枝梗では、低温区や福山平年区に比べてほぼ一様に低下した。福山平年区と差が小さくなった 1 次枝梗では、不稔歩合が高かったため、前述した 1 粒あたりの炭水化物供給量の増加により玄米 1 粒重が相対的に高くなったものと考えられた。なお、1—5 高温区の下位の 1 次枝梗において福山平年区に比した玄米 1 粒重の増加程度が大きかったことも、同様の要因が考えられた。また、実験 2 で用いた 10 品種のうち 8 品種で、高温による玄米 1 粒重の低下程度は籾の次数（松葉 1991）によって大きく変わることはなかったが、森田早生とヒノヒカリでは 3 次籾で低下程度が大きかった。

これらのことから、高温による玄米 1 粒重の低下はいずれの着粒位置においても生じること、その低下程度は、品種によっては弱勢穎果と言われる下位の 1 次枝梗や 3 次籾で大きいこと、が示唆された。前者の特徴は、高温による粒重低下が全ての着粒位置で生じるというコムギについての Sofield ら (1977) の報告と符合した。これらの結果は、佐藤・稲葉 (1976) が指摘しているように高温による粒重低下が単に炭水化物不足によるものではなく籾の炭水化物受け入れ能力の問題が関係していることを強く示唆している。また、後者の特徴に関連して、Sato and Takahashi (1971) は、高温によって特に穂の下部の玄米 1 粒重の低下が著しいことを農林 17 号と IR 8 で認めている。遮光や止葉剪葉で生じた炭水化物不足による粒重低下は弱勢穎果で特に大きくなる (Nagato and Chaudhry 1970) ことから、高温による粒重低下の一因としてやはり炭水化物不足があることも示唆される。今後、これらの現象を包括的に説明し得る高温による玄米 1 粒重低下のメカニズムを明らかにしていく必要がある。

玄米の良質粒歩合は登熟期全体の高（高温）および開花後 1—2 週間目前後の高温によって低下し、この結果は長戸・江幡 (1960) の報告と一致した。日本晴を用いた実験 1 の福山平年区では未熟粒の増加、高温区ではそれに加えて被害粒の増加を伴っていた。この 35℃/26℃の高は 4 日間のみ与えられた場合にも被害粒を増加させた。また、キヌヒカリと中生新千本を用いた実験 2 の高温区において、

1, 2 次籾では未熟粒歩合が, 3 次籾では被害粒が増加した。本実験では透明度の低い白濁した玄米が未熟粒, 反射光の赤色光/緑色光比が高い, いわゆる茶色の玄米が被害粒に分類された。今後, 高温による外観品質の低下を透明度と色の変化の両面から検討していく必要があるだろう。

最後に, 高温による玄米 1 粒重の低下程度の品種間差異について考察したい。実験 2 では, 高温処理の開始時期を先端穎花の開花後 4 日目としており, これ以降に開花した穎花を除いて高温不稔は発生しなかったと見られる。このため, 実験 1 のように不稔発生による残りの穎果の发育への影響はほとんどなかったと考えられる。ただし 1 穂粒数の多かった Lakhi Jhota やアケノホシの高温区では, 下位の穎花が開花時に高温となったため不稔が発生したと推察された。このような条件において, 玄米 1 粒重の高温による低下程度は品種によって異なった。これまでの研究でコシヒカリの高温登熟性が優れていることが報告されている (長戸ら 1961, 岩下ら 1973, 佐々木ら 1983)。しかし, 本実験ではコシヒカリで玄米 1 粒重の高温による低下程度が小さいとは認められなかった。高温区の粒重が低温区のそれより 10% 以上低下した品種は, 森田早生, 大粒のジャワ型品種の Arborio, 極穂重型で登熟不良となりやすい日本型品種アケノホシなどであった。一方, 高温区での粒重低下程度が 5% 未満であった品種は, 環境による品質の振れが小さいと言われるコガネマサリ, 小粒のジャワ型品種の Lakhi Jhota, アケノホシと兄弟であり極穂重型で登熟が良いインド型品種のホシユタカであり, いずれの品種も出穂期が遅い共通点があった。しかし, 穂数型と穂重型, 3 次籾数の比率, 大粒と小粒の違いによって, 高温による玄米 1 粒重の低下程度の違いを十分に説明することはできなかった。また, 地上部重の温度反応性と高温登熟性との関係を検討したが, 両者に一定の関係はみられなかった。今後, 早晚性や環境による登熟安定性の視点も含めて, 高温登熟性の品種間差異の機構について検討を重ねていく必要があると考える。

**謝辞:** 本研究を実施するにあたり, 中国農業試験場栽培生理研究室松葉捷也室長 (現北陸農業試験場企画連絡室長) に多くの御指導を頂いた。佐竹徹夫博士 (元北海道農業試験場) には実験方法について貴重な御助言を頂いた。研究のとりまとめにあたって, 広島大学生物生産学部藤田耕之輔教授と中国農業試験場栽培生理研究室高梨純一室長に御指導を頂いた。供試材料の管理, 分析にあたっては中国農業試験場業務科および今川房江さんに御協力を頂いた。深く感謝いたします。

## 引用文献

Chowdhury, S.I. and I.F. Wardlaw 1978. The effect of temperature on kernel development in cereals. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 205—223.  
Hansen J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R.

Ruedy and J. Lerner 1984. Climate process and climate sensitivity. Hansen, J. and T. Takahashi ed., *American Geophysical Union*. 130—163.

伊藤夫仁 1979. 水稻登熟期の気温が収量並びに米質に及ぼす影響. 広島県農試報 41: 1—8.

岩下友記・新屋明・山川恵・土井修・上原裕美・鳥山国土 1973. 水稻の高温登熟について—品質の変化と品種間差異—. 日作九州支報 39: 48—57.

松葉捷也 1991. イネの穂の着粒構造の分析およびその形成機構論. 中国農試研報 9: 11—58.

松島省三・真中多喜夫 1957. 水稻収量の成立と予察に関する作物学的研究 XXXIX. 水稻の登熟機構の研究 (5). 生育各期の気温の高低・日射の強弱並びにその複合条件が水稻の登熟に及ぼす影響. 日作紀 25: 203—204.

棟方研・川崎勇・仮谷桂 1967. 気象および稲体要因からみた水稻生産力の定量的研究. 中国農試研報 A 14: 59—96.

村田吉男 1964. わが国の水稻収量の地域性に及ぼす日射と温度の影響について. 日作紀 33: 59—63.

長戸一雄・江幡守衛 1960. 登熟期の気温が水稻の稔実に及ぼす影響. 日作紀 28: 275—278.

長戸一雄・江幡守衛・河野恭広 1961. 米の品質からみた早期栽培に対する適応性の品種間差異. 日作紀 29: 337—340.

Nagato, K. and F. M. Chaudhry 1970. Influence of panicle clipping, flag leaf cutting and shading on ripening of Japonica and Indica rice. *Proc. Crop. Sci. Soc. Jpn.* 39: 204—212.

Osada, A., V. Sasiprapa, M. Rahong, S. Dhammanuvong and H. Chakrabandhu 1973. Abnormal occurrence of empty grains of Indica rice plants in the dry, hot season in Thailand. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan* 42: 103—109.

佐々木康之・今井良衛・細川平太郎 1983. 高温下で登熟する玄米品質の劣化防止技術. 新潟農試報 33: 45—54.

Satake, T. and S. Yoshida 1978. High temperature-induced sterility in indica rices at flowering. *Jpn. J. Crop Sci.* 47: 6—17.

Sato, K. and M. Takahashi 1971. The development of rices grain under controlled environment. I. The effects of temperature, its daily range and photoperiod during ripening on grain development. *Tohoku J. Agr. Res.* 22: 57—68.

佐藤庚・稲葉健五・戸沢正隆 1973. 高温による水稻の稔実障害に関する研究. 第 1 報 幼穂形成期以降の生育時期別高温処理が稔実に及ぼす影響. 日作紀 42: 207—213.

佐藤庚・稲葉健五 1976. 高温による水稻の稔実障害に関する研究. 第 5 報 稔実期の高温による籾の炭水化物受入れ能力の早期減退について. 日作紀 52: 156—161.

Sofield, I., L.T. Evans, M.G. Cook and I.F. Wardlaw 1977. Factor influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust. J. Plant. Physiol.* 4: 785—797.

Tashiro, T. and I.F. Wardlaw 1991a. The effect of high temperature on the accumulation of dry matter, carbon and nitrogen in the kernel of rice. *Aust. J. Plant. Physiol.* 18: 259—265.

Tashiro, T. and I.F. Wardlaw 1991b. The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice. *Aust. J. Agric. Res.* 42: 485—496.

和田道宏 1980. 気温の日変化に関する研究 I. 日変化のモデル. 農業気象 36: 19—24.



山本健吾 1952. 夜温の高低と水稻の登熟について. 東北大学農学研究  
所彙報 4: 181—188.  
Yoshida, S. and T. Hara 1977. Effect of air temperature and light

on grain filling of an indica and japonica rice (*Oryza sativa* L.)  
under controlled environmental conditions. Soil Sci. Plant Nutr.  
23: 93—107.

**Effects of High Air Temperature on Ripening in Rice Plants**—Analysis of ripening performance in growth chamber experiments: Satoshi MORITA\* (*Chugoku Natl. Agr. Exp. Stn., Fukuyama 721—8514, Japan*)

**Abstract:** The effects of high temperature (32°C/23°C max/min; 27.5°C, daily mean temperature), which is common in August in Fukuyama city, Japan, on the grain weight and the grain quality of rice plants were examined. Air temperature was controlled artificially in growth chambers. The grain weight at 32°C/23°C was lower than at 28°C/19°C as a control in all primary branches at a panicle. The proportion of normal grains relative to all grains was smaller at 32°C/23°C. Moreover, the grain weight and the proportion of normal grains relative to all grains at 35°C/26°C were smaller than those at 32°C/23°C. The decrease in grain weight at high temperature accompanies the decrease in grain thickness. The proportion of imperfectly ripened grains relative to all grains at 32°C/23°C was higher than that at 28°C/19°C, and the proportion of nonfertilized grains at 35°C/26°C was higher than that at 32°C/23°C. The cultivars for which the ratio of grain weight at 35°C/26°C to that at 28°C/19°C was lower than 90% were Moritawase, Arborio as a large grain, and Akenohoshi, which tended to have a bad ripening performance. In contrast, the cultivars with a ratio higher than 95% were Koganemasari, Lakhi Jhota as a small grain, and Hoshiyutaka, known as a good ripened cultivar.

**Key words:** Grain position, Grain quality, Grain weight, Growth chamber, High temperature, Rice, Ripening, Varietal difference.

## 書評

作物 I [稲作]. 後藤雄佐・新田洋司・中村聡著. (社)全国農業改良普及協会, 東京. 2000 年 4 月, 212 頁, 2600 円.

本書では、稲の生長とそれにあわせた栽培技術、その裏付けとなる作物学的知見、基本的な形態などが、わかりやすく、要領よくかつ正確に記述されており、学生、普及員、研究者が稲作の教科書として読むのはもちろんのこと、先進的な稲作農家がより深く稲について勉強するのにとも向いている、形態や生長に関する総合的な稲作の本である。第 1, 2 章では、基本的な稲の姿と生長を、多くのわかりやすい図と、葉・茎・根・穂の綺麗な電顕写真などの最近の知見をまじえて、形態の概説から詳細までについて記述している。第 3～5 章では播種、育苗、移植についての実際と、それらにまつわる諸問題、例えば、乳苗、直播栽培などを多くの写真とともに解説している。第 6～9 章では分けつ、幼穂の発達、出穂、開花、受精、登熟までの各過程について、過去の膨大な稲の生長や形態に関する知見のなかから、稲作に関心のあるものが特に知っておくべきものを的確に取捨選択し、それらを裏付けとしながら詳細に、かつわかりやすく解説している。第 10～13 章では、本田管理から収穫までを、畦畔の維持、不耕起移植、有機農法、深水栽培、水田の環境保全機能などもまじえながら述べている。第 14 章で品質、第 15 章で品種についてが簡単に記述されている。しいて本書の難点を挙げれば、品質・食味が稲作にとって極めて大きな重要性を占めている今日、これらの最近の知見や、稲作に欠くことのできない品種の特徴や育成についてももう少し記述されていればとの感はあるが、むしろそれらを最小限とすることで、本書の優れた教科書としての特徴をだすことに成功しているとも言えよう。稲や稲作についての本は既に数多いのであるが、本書は手軽に買え、かつ生育や形態についての詳細、およびそれらの栽培の実際との関連を扱った教科書としての価値が高いと思われるので、さらにもう 1 冊本書を書棚に付け加えられることを是非お勧めしたい。

(九州大学 吉田智彦)