

出穂期以前の高温条件が水稻の生育、根／地上部重比および玄米外観品質に及ぼす影響

和田義春・大柿光代・古西朋子

(宇都宮大学農学部)

要旨：水稻では、登熟期が高温になると乳白米や背白米等の白未熟粒が多発することが知られている。近年、気温は平年より高まる傾向にあり、登熟期だけでなく栄養生長期の気温も上昇している。そこで本研究では、水稻品種コシヒカリを供試し、自然光ファイトロンを利用して、出穂期以前の高温が水稻の生育と玄米外観品質に及ぼす影響を調査した。移植後7日目から50日間の栄養生長期における高温処理(32/27℃)は、中温処理(27/22℃)、低温処理(22/17℃)に比べて、地上部の生育を旺盛としたが、根の生育促進は伴わず、根／地上部重比を小さくした。土壤溶液中のアンモニア態窒素発現は、高温区ほど多かったことから、高温が土壤窒素の発現を介して間接的に根の生育を抑制した可能性が考えられた。一方、水耕栽培で窒素濃度を一定として温度条件を変えた実験でも高温区ほど根／地上部重比が小さくなったので、栄養生長期の高温による根／地上部重比の低下には温度の直接的な影響と土壤窒素を介しての間接的な影響があると考えられた。出穂期前28日間の高温処理(32/27℃)により根／地上部重比を小さくした区では、低温処理(27/22℃)区に比べて出穂後の高温(32/27℃)による白未熟粒の発生が多かった。出穂前に高温処理した区では、葉面積は大きかったが、純同化率が小さかったため登熟期の乾物重増加が小さかった。このことには、株あたりの出液速度で示される根の生理活性の低下と葉の老化促進が関与していると考えられた。

キーワード：高温登熟障害、白未熟粒、水稻、土壤窒素、根／地上部重比、根の生理活性。

近年、乳白米などの白未熟粒の多発による米品質の低下が問題となっている(寺島 2003, 近藤ら 2005, 森田 2005)。栃木県でも早植えコシヒカリを中心に、乳白粒、心白粒、胴割粒等の発生率が高まっており、玄米品質の低下が報告された。品質低下の原因は年度によって異なる(大谷ら 2003)が、近年全国各地で報告されている玄米品質の低下については、主に登熟期の高温が原因であるとされ、これまでの試験研究の結果を総合すると、出穂後2~3週間の平均気温について、最高気温32℃、平均気温27~28℃、最低気温23~24℃以上の高温が、白未熟粒が多発し品質が低下する条件と考えられている(Tashiro and Wardlaw 1991, 寺島 2003, 森田 2005, 2008)。しかし、近年の温暖化では水稻の登熟期だけでなく栄養生長期の気温も上昇してきている。栄養生長期の高温は水稻の生育を早め、出穂期が早まるため登熟期が盛夏の高温期と重なることのみならず、水稻の生育にさまざまな影響を及ぼす。井上ら(2004)は、1984年から2000年まで同一圃場で連続してほぼ同一耕種条件で栽培されたコシヒカリのデータを解析し、6月の地上部乾物重は近年増加傾向にあること、初期成育が旺盛でありすぎると中期の根重増加が停滞し登熟期間の根／地上部重比(R/S比)を低くすることが収量や品質に関係すると述べている。一般に、高気温下では作物のR/S比が低下しやすいとされ(近藤ら 2005)、水稻において佐藤(1972, 1974)は、栄養生長に及ぼす気温の影響を調べ、高気温下では同化産物を葉身へ多く分配し、低温条件下では相対的に根へ多く分配するために、高温ほど地上部／根重比が高

くなり、逆にR/S比は低くなることを報告している。しかし、高温下では一般に葉齢の進行が速くステージの進行が促進されることが知られており、イネにおいてはステージが進行するほどR/S比が低下すると報告されている(森 1960, 森田 2001)。佐藤(1972)は、温度処理の期間を同一にして生育を比較する場合にはこの影響が含まれるので、同一のステージでの比較が必要であると述べている。そこで本研究では、この点について検討を行なうこととした。また、一般にイネのR/S比は、培地の窒素濃度の影響を受け、高窒素濃度下ではR/S比が低下するとされるが(稲田 1967)、高温下では土壤窒素の無機化速度や土壤還元の進行速度が速くなり、このことを通じて根の成長への温度の間接的な影響も考えられる(狩野ら 1989)。そこで本研究では、高気温下での地温の変化と土壤環境の変化にも着目して調査を行ないつつ、出穂期以前の高温が水稻の生育と玄米外観品質に及ぼす影響を調査した。本研究は宇都宮大学環境調節棟の自然光ファイトロンを利用した3つの実験からなる。実験1では、栄養生長期の高温が水稻地上部と根の生育に及ぼす影響を調査するため、ポット土耕栽培で温度を変えて実験を行った。その際、ステージの問題と土壤還元や土壤のアンモニア態窒素(NH₄-N)の溶出といった土壤環境の変化に着目した。実験2では、水耕実験を行い、土壤還元や栄養条件の影響をできるだけ除去した条件で温度の直接の影響を評価しようとした。また、実験3では、出穂前の高温処理が出穂後の乾物生産と玄米外観品質に及ぼす影響を調査した。

材料と方法

1. 土耕栽培における高温が地上部と根の生育に及ぼす影響（実験1）

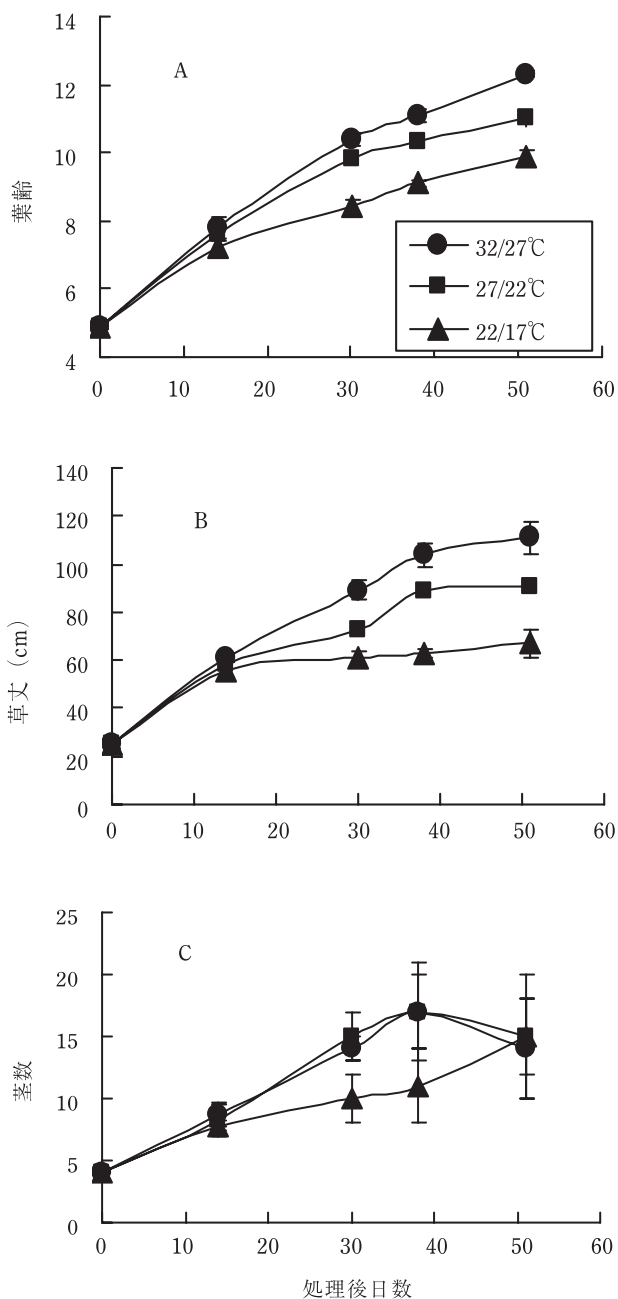
27/22℃の温室で19日間育苗したコシヒカリ苗を、2003年5月8日に黒色火山灰土を充填した1/5000aワグナーポットにポットあたり3株、1株2本植えて移植した。直射日光による地温の上昇を防ぐためポットの周りに不織布（タイベック、デュポン社）を巻き、屋外ビニールハウス内で1週間栽培した後、宇都宮大学環境調節実験棟自然光ファイトトロンの高温（32/27℃）、中温（27/22℃）、低温（22/17℃）の3室で50日間栽培した。基肥に被覆尿素（LPコート100、チッソ（株）、N40%）と過リン酸石灰、塩化カリウムを用いて、ポットあたりN、P₂O₅、K₂Oを各1g施用した。各温度処理区には、植物を植えない裸地ポットを設けた。ポットは、各室に汲み置いた水道水で毎日灌水を行い、実験期間中湛水状態を保った。温度処理開始後30、38、51日目に各区6株を掘り取り、根をできるだけいねいに水洗した後、葉身、葉鞘、根に分けて80℃で1週間乾燥して乾物重を秤量した。土壌環境は、Eh計（RM-20P、東亜DKK）、pH計（HM-21P、東亜DKK）を地表下10cmに設置して各区6反復で測定した。土壌溶液は、ファイバー式土壌溶液採取器（DIK-30IA-AI、大起理化）で深さ5～15cmの範囲から温度処理開始後44から49日の間に各区の植物を植えたポットと裸地ポットについて、それぞれ3回ずつ各50ml採取して、採取後直ちにNH₄-Nを水蒸気蒸留法で測定した。

2. 水耕栽培における高温が地上部と根の生育に及ぼす影響（実験2）

アルミ箔で覆った1Lメスシリンダー（深さ40cm）上部に設置した網上に、催芽後、室温、水道水で7日間育成したコシヒカリ粳を2003年9月2日に置床し、宇都宮大学環境調節実験棟自然光ファイトトロンの高温（32/27℃）、中温（27/22℃）、低温（22/17℃）の3室で6葉期まで30日間栽培した。水耕液には木村氏B液を用い、週に1度液を交換した。また、毎日蒸散で減少した水量を各室に汲み置いた水道水で夕刻に補充した。温度処理開始後14、21、30日目に各区10個体採取し、葉身、葉鞘、根に分けて80℃で1週間乾燥して乾物重を秤量した。

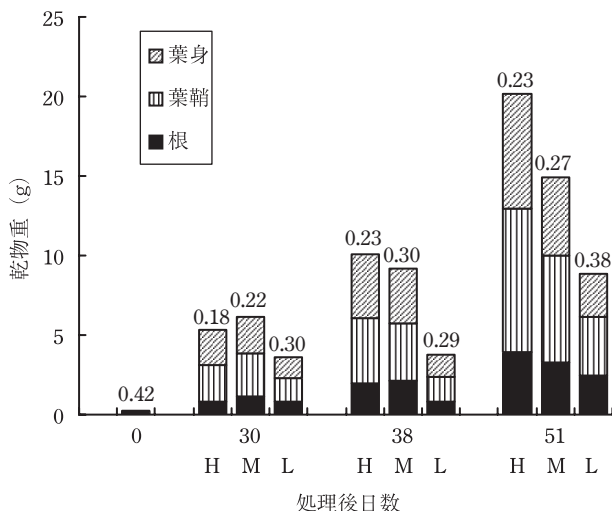
3. 出穂前的高温が、収量構成要素および玄米外観品質に及ぼす影響（実験3）

黒色火山灰土（風乾土7.5kg）と化成肥料（10-18-16）6gおよび被覆尿素（LPコート100、チッソ（株）、N40%）1.5gを混合充填した1/2000aワグナーポットに播種後20日のコシヒカリ苗をポットあたり3株、1株1本植えて2005年5月27日に移植した。ポットの周りに不織布（タイベック、デュポン社）を巻き、屋外ビニールハウ



第1図 葉齢、草丈、茎数の推移（実験1）。
図中の縦棒は標準偏差（n=6）を示す。

ス内で栽培し、7月15日に宇都宮大学環境調節実験棟自然光ファイトトロンの32/27℃、27/22℃の2室に移した。出穂始は、32/27℃で8月8日、27/22℃では8月12日であり、出穂期（約50%出穂）は、それぞれ8月13日と16日であった。27/22℃の出穂始めにあたる8月12日に27/22℃室のポットを32/27℃室に移し、以後はともに32/27℃室で栽培した。温度処理開始の7月15日、出穂始めの8月12日および収穫期の9月21日に各区6株の地際から10cmの位置で切断し、あらかじめ重量を測定した脱脂綿を充填したビニール袋を装着し、2時間出液を採取した。切り取った地上部は、葉面積計（AAM-8、林電工）で



第2図 各処理区1株あたりの乾物重の推移 (実験1)。

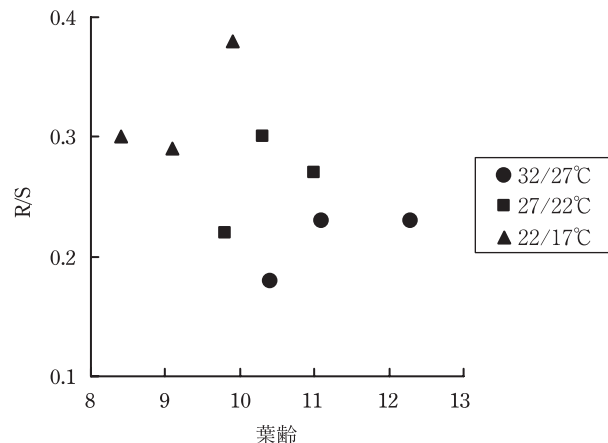
6株の平均値、図中の数値はR/S比を示す。横軸のH, M, Lは、それぞれ32/27°C, 27/22°C, 22/17°C区を示す。

葉面積を測定後、穂、葉身、葉鞘と稈に分けた。出液採取後、残りの植物体を掘り取り、根をできるだけいねいに水洗したのち根と地上部に分け、地上部は葉鞘と稈に合して、各器官を80°Cで1週間乾燥して乾物重を秤量した。これらの値から、成長解析を行った。収穫期の9月21日に各区3株を地際で刈取り、風乾後収量構成要素の調査を行った。さらに、玄米約1000粒ずつ3反復で旧食糧庁の被害粒等限界基準に準じて外観品質を調査した。葉色の測定は、出穂期の8月15日と21日後の9月5日に葉緑素計 (SPAD502, ミノルタ社) を用い、一区6株の主茎に着生する上位5葉身について測定した (以下測定値をSPAD値と示す)。

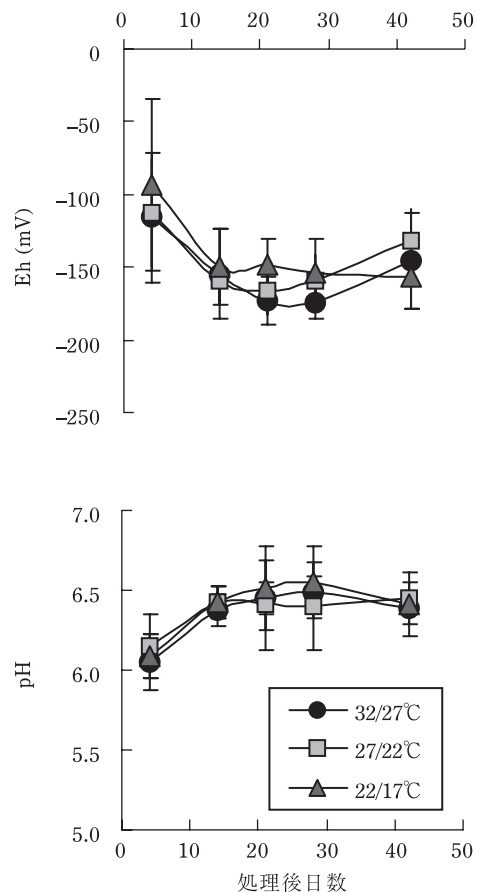
結 果

1. 土耕栽培における高温が地上部と根の生育に及ぼす影響 (実験1)

第1図に実験1における葉齢、草丈、茎数の推移を示した。葉齢の進行は、高温区で早まり、温度処理開始後14日目から温度処理区間で0.6葉の差が生じ、51日目には高温区と中温区および中温区と低温区との間の差はそれぞれ約1葉となった (第1図A)。草丈も同様に高温区で大きな値を示し、51日目には高温区と中温区および中温区と低温区との間の差はそれぞれ約20cmとなった (第1図B)。茎数は高温区と中温区が低温区より早く増加したが、高温区と中温区では処理後40日目以降やや減少したので処理後51日目には各区で差異がなくなった (第1図C)。第2図に各区の器官別乾物重とR/S比の推移を示した。全乾物重は、処理後30, 38日目には高温区と中温区とでは有意差がなく、低温区のみ小さかったが、処理後51日目には高温の区ほど重くなった。乾物重を器官別にみると、地上部の葉身と葉鞘の乾物重は高温区ほど重くなり、その差は



第3図 葉齢と根 / 地上部重 (R/S) 比の関係 (実験1)。



第4図 EhとpHの推移 (実験1)。

図中の縦棒は標準偏差 (n=6) を示す。

日数の経過とともに拡大した。一方、根の乾物重は処理後51日目には高温区ほど重くなったが、処理後30日目には各区に有意差はなく、38, 51日目にも高温区と中温区との間には有意差は見られなかった。以上のように高温による成長促進は地上部において著しく、根部では差が小さかった。このため高温条件では低温条件よりもR/S比が小さくなった。本実験では、温度によって葉齢の進行が大きく異

なったので (第1図A), ステージの違いによる R/S 比の問題を除去して考えるため, 第3図に葉齢と R/S 比の関係を作図した. この図から, ほぼ同一の葉齢において比較しても, R/S 比は高温区で小さい値を示した.

2. 高温が土壤還元および土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出に及ぼす影響 (実験1)

第4図に土壌の Eh と pH の推移を示した. Eh は, 処理開始後数日間ばらつきが大きかったが, 処理開始後14日目以降はすべての区で約 -150 mV のほぼ一定の値で推移した. pH は, 温度処理開始後14日目までやや上昇した後, すべての区で約 6.5 のほぼ一定の値で推移した. このように Eh と pH の推移には各温度処理区間で大きな差異は認められなかったため, 土壌還元の進行速度への温度の影響は本実験の範囲では小さいと判断された. 第1表に植物ポットと裸地ポットの土壌溶液中アンモニア態窒素量 ($\text{NH}_4\text{-N}$) を示した. 土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$ は, 植物ポットではほぼ0であった. 裸地ポットでは高温ほど多量の $\text{NH}_4\text{-N}$

が検出され, 高温区と他の2処理区との間に5%水準で有意差が認められた (第1表). したがって, $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出は高温で促進されるが, 溶出後すぐ植物根に吸収されたと考えられた.

3. 水耕栽培における高温が地上部と根の生育に及ぼす影響 (実験2)

第2表に水耕実験における葉齢と R/S 比の推移を示した. 窒素濃度を一定とした水耕栽培においても, 高温ほど葉齢の進行が早まった. R/S 比は, 21日目の27/22℃区と22/17℃区間に有意差が見られなかった他は, どの測定日でも高温条件程有意に小さくなった. 5.7 ± 0.1 のほぼ同一葉齢となった21日目の32/27℃区, 27/22℃区および30日目の22/17℃区を比較しても, R/S 比は高温区ほど有意に小さかった. 以上のように, 高温下で R/S 比が小さくなることには, 高温下で地力窒素の無機化が促進されることと, 高温による直接の影響の両者が考えられた.

4. 出穂前的高温が, 出穂前後の乾物生産に及ぼす影響 (実験3)

温度処理開始期, 出穂期および出穂後40日目の器官別の乾物重を第3表に示した. 出穂期には, 統計的には有意ではないものの, 出穂前28日間を高温の32/27℃とした区は27/22℃区に比べ葉面積と葉身重が大きく, 根重は小さくなる傾向にあり, このため R/S 比は高温区で有意に低かった. 出穂後40日目にも同様の傾向が見られた. 出穂

第1表 植物ポットと裸地ポットのアンモニア態窒素量 (実験1).

	アンモニア態窒素量 (mg L^{-1})		
	32/27℃	27/22℃	22/17℃
植物ポット	1.1	0	0
裸地ポット	86.4 a	60.3 b	52.9 b

3ポットの平均値, 裸地ポットにおいて同一記号の付いた平均値間には5%水準での有意差がない (ダンカンの多重検定法による).

第2表 水耕実験における葉齢と根 / 地上部重比 (R/S 比) の推移 (実験2).

温度処理区	14日目		21日目		30日目	
	葉齢	R/S 比	葉齢	R/S 比	葉齢	R/S 比
32/27℃	5.0	0.25 d	5.8	0.20 e	7.2	0.25 d
27/22℃	4.6	0.28 c	5.6	0.27 cd	6.7	0.28 c
22/17℃	3.7	0.35 b	4.9	0.28 c	5.7	0.38 a

数値は, 6個体の平均値. R/S 比において, 同一記号の付いた平均値間には5%水準での有意差がない (ダンカンの多重検定法による).

第3表 出穂前に異なる温度処理を行った区の株あたり葉面積, 乾物重および根 / 地上部重比 (R/S 比) の推移 (実験3).

出穂前 温度処理区	葉面積 (cm^2)	乾物重 (g)					R/S 比
		穂	葉身	葉鞘	枯死葉	根	
出穂前28日	1197		5.3	7.8		4.0	0.30
出穂期	32/27℃	2.2	7.9	19.7	0.7	4.2	0.14
	27/22℃	1.3	6.9	19.9	0.7	4.6	0.16
	ns	*	ns	ns	ns	ns	**
出穂後40日	32/27℃	19.0	5.2	22.3	2.5	4.2	0.09
	27/22℃	16.2	5.4	25.2	3.1	5.5	0.11
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**

数値は, 6株の平均値. 表中の ns, *, および ** は, 同一の測定日において, それぞれ出穂前温度処理区間に有意差がない, 5%で有意, 1%で有意であることを示す (t検定).

第4表 出穂前に異なる温度処理を行った区における出穂前後の成長解析結果 (実験3)。

	出穂前 温度処理区	乾物増加率 (GR) (g d ⁻¹)	平均葉面積 (cm ²)	純同化率 (NAR) (g m ⁻² d ⁻¹)
出穂前 28 日間	32/27℃	0.52	1503	4.15
	27/22℃	0.55	1371	4.24
出穂後 40 日間	32/27℃	0.46	1539	3.01
	27/22℃	0.55	1389	3.95

第5表 出穂前に異なる温度処理を行った区の出液速度の推移 (実験3)。

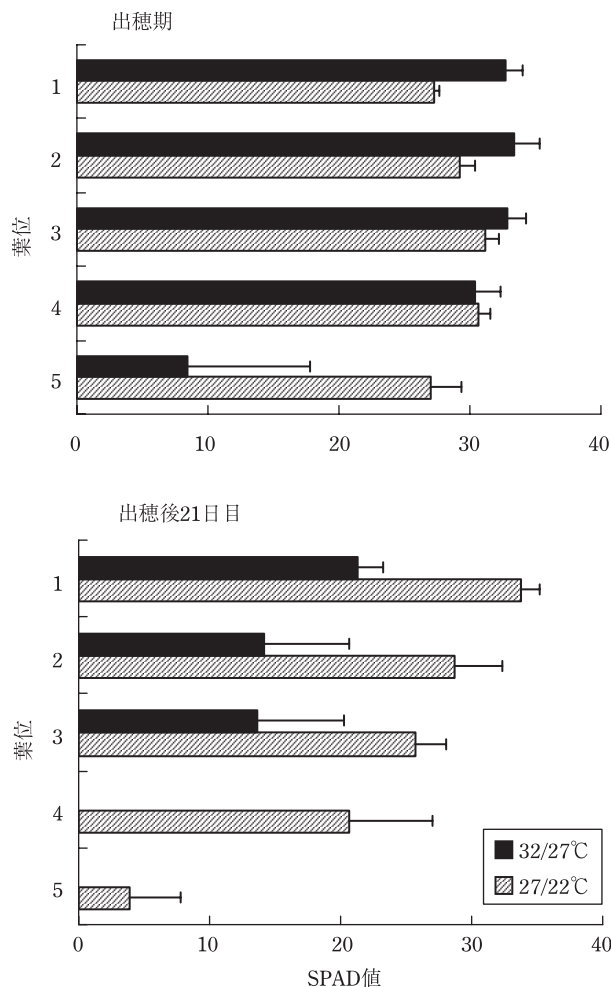
温度処理区	出穂期	出穂後 40 日
株あたり出液速度 (g 株 ⁻¹ h ⁻¹)		
32/27℃	2.96	0.57
27/22℃	3.89	0.75
	*	*
単位根重あたり出液速度 (g g ⁻¹ h ⁻¹)		
32/27℃	0.71	0.14
27/22℃	0.85	0.14
	ns	ns

数値は、6 株の平均値。表中の ns, * は、同一の測定日において、それぞれ出穂前温度処理区間に有意差がない、5%で有意であることを示す (t 検定)。

前後の乾物重増加から成長解析を行った結果を第4表に示した。出穂前の成長においては、平均葉面積は高温区で大であったが、逆に純同化率 (NAR) は高温区のほうが低く、乾物増加率 (GR) は高温区のほうがやや低かった。出穂後の乾物生産も平均葉面積は出穂前高温区で大であったが、逆に NAR は出穂前高温区のほうが低く、GR は高温区のほうが低くなった。出穂期と出穂後 40 日目の株あたり出液速度を第5表に示した。株あたり出液速度で示される根の生理活性は出穂前高温区が低い値を示した。出穂期と出穂後 21 日目の主茎葉位別の SPAD 値を第5図に示した。出穂期には、有意ではないものの上位の3葉身の SPAD 値が出穂前高温区で高い傾向にあったが、第5葉では逆に高温区で有意に低くかった。出穂後 21 日目には、すべての葉位で出穂前高温区の値が有意に低く、出穂前高温区の第4、5葉は枯死していた。

5. 出穂前の高温が、収量構成要素および玄米外観品質に及ぼす影響 (実験3)

収量構成要素を第6表に示した。平均1穂粒数と登熟歩合には有意差がなかった。出穂前高温区では、1株穂数が有意に少なかったが、精玄米千粒重は有意に大となったため、1株あたりの精玄米重はやや少なかったものの有意差はなかった。玄米外観品質を第7表に示した。出穂前高温区では、背白米が有意に多く、また有意ではなかったが乳白米や腹白米も多い傾向にあり、白未熟米合計は有意に多かった。



第5図 出穂期と出穂後 21 日目の主茎葉位別 SPAD 値 (実験3)。
葉位は、上位葉から付した。図中の横棒は、標準偏差 (n=6) を示す。

考 察

1. 栄養成長期の高温による R/S 比の低下とその要因

本研究では、ポットで土耕栽培した場合 (実験1) にも、水耕栽培を行った場合 (実験2) にも、高温で栽培した場合ほど R/S 比が低下し (第2図, 第2表), 高温下では地上部の生育が促進され相対的に根の小さい植物体となるという従来の知見 (佐藤 1972, 1974) と一致する結果が得られた。高温下では一般に葉齢の進行が速くステージの進行が促進されることが知られており、イネにおいてはステー

第6表 出穂前に異なる温度処理を行った区の収量構成要素 (実験3)。

出穂前 温度処理区	株あたり 穂数	平均 1穂粒数	株あたり 精粒数	登熟歩合 (%)	精玄米 千粒重 (g)	株あたり 計算収量 (g 株 ⁻¹)
32/27℃	11.3	69.1	714	91.2	23.0	16.4
27/22℃	15.0	62.8	867	92.8	20.9	18.2
	*	ns	*	ns	**	ns

数値は、3株の平均値。表中の ns, *, および ** は、それぞれ、出穂前温度処理区間に有意差がない、5%で有意、1%で有意であることを示す (t 検定)。

第7表 出穂前に異なる温度処理を行った区の白未熟粒割合 (実験3)。

温度処理区	乳白	心白	背白	腹白	基白	白未熟粒合計
32/27℃	4.0	0.9	13.5	3.9	0.0	22.2
27/22℃	1.5	0.0	5.3	1.4	1.6	9.8
	ns	ns	*	ns	ns	*

数値は、1000粒中の発生数。3株の平均値。表中の ns, * は、それぞれ、温度処理区間に有意差がない、5%で有意であることを示す (t 検定)。

ジが進行するほど R/S 比が低下すると報告されている (森 1960, 森田 2001)。佐藤 (1972) は、温度処理の期間を同一にして生育を比較する場合にはこの影響が含まれるので、同一のステージでの比較が必要であると述べている。そこで本研究では、この点について土耕 (実験1) および水耕 (実験2) について検討を行ったところ、ほぼ同一のステージで比較しても高温条件のほうが R/S 比が低くなることを確認した (第3図, 第2表)。一般に土壌の無機栄養とくに窒素濃度が高いほど R/S 比は小さくなるとされる (稲田 1967)。高温で促進されると考えられる地力窒素の無機化による影響が高温条件下で R/S 比が低くなることに関係するかどうかについて、本研究では、地力窒素の代替として高温ほど早く溶出する被覆尿素 (LP コート 100) を使用して検討を行った。実験1では、裸地ポットで高温ほど多量の $\text{NH}_4\text{-N}$ が検出され、被覆肥料の溶出が高温で促進されたが、溶出した $\text{NH}_4\text{-N}$ は速やかに稲体に吸収され、植物を植えたポットの土壌溶液中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高まることはなかった (第1表)。また、水耕栽培で $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度をほぼ一定に保って温度処理を行った実験2においても高温条件のほうが R/S 比が低くなったので (第2表)、栄養成長期の高温条件による R/S 比の低下は土壌窒素濃度の影響なしでも起こるものと判断された。ただし、高温ほど窒素の吸収が促進されたことも事実であり、高温下での R/S 比低下に窒素吸収量増加の影響が関与することは否定できない。また、本実験の範囲内では土壌還元の進行速度への温度の影響は小さかったが (第4図)、本実験はポット栽培であり、毎日灌水して常時湛水を保ったが、蒸散による水の動きは圃場条件に比べ比較的大きいと考えられ、今後圃場条件や、中干し処理を加えた検討が必要であろう。

2. 出穂前的高温による R/S 比の低下が出穂後の乾物生産および玄米品質に及ぼす影響

実験1と実験3とでは高温処理の時期が異なるが、実験3でも実験1と同様に、出穂前的高温は、地上部の成長を促進し、出穂期には出穂前高温区のほうが葉面積、葉身重は大きくなったが、根の成長は出穂前的高温によって抑制され R/S 比の小さい相対的に根の小さい個体となった (第3表)。出穂期の根群の活力を出力速度で比較したところ、R/S 比の小さい出穂前高温区は対照区よりも有意に低くなった (第5表)。このとき、単位根重当たりで比較すると有意な差がなかったことから、この出穂期の根群の活力の違いは主に根の量の差に基づくものと考えられた。出穂期に R/S 比が低かった出穂前高温区では、下葉の枯れ上がりが早く (第5図)、出穂後の NAR や乾物重増加量が小さいという対応関係があった (第4表)。根の吸水能力が低下すると気孔開度が小さくなり、光合成能力が低下すると報告されており (平沢ら 1987)、津野・山口 (1987) は、根の呼吸が衰えた個体では総光合成の高温低下が著しいと報告している。したがって、本研究でみられた出穂前高温区で NAR や乾物重増加量が小さかったことには光合成能力の低下が関与していると考えられた。根系全体としての機能が低くなった出穂前高温区では、登熟歩合や1株玄米重は有意差がなかったが、玄米外観品質においては背白米が有意に増加し、乳白米や腹白米も増える傾向にあって、白未熟粒の割合は有意に増加した (第6表, 第7表)。田畑ら (2008) は、出穂7日後に根群の1部を切除すると下葉の老化・枯死が進み、その結果背白米・基白米発生率が増加したと報告している。したがって、本実験の結果は、出穂前的高温が地上部の成長を促進して相対的に根の小さい植物体を作り、根群全体の活力が低いため、出穂後に高

温に遭遇すると、葉の老化が促進され、乾物生産が減少し、白未熟米の多発を招きやすくする可能性が考えられた。井上ら (2004) は、1984 年から 2000 年まで同一圃場で連続してほぼ同一耕種条件で栽培されたコシヒカリのデータを解析し、6 月の地上部乾物重は近年増加傾向にあること、初期成育が旺盛でありすぎると中期の根重増加が停滞し登熟期間の R/S 比を低くすることが収量や品質に関係すると述べている。本研究のポット栽培でのモデル実験の結果は、上記の圃場での調査結果を裏付けるものと考えられる。以上のことから、近年の温暖化は登熟期間の高温による直接の登熟障害のみならず、栄養成長期間の高温条件も地上部と根の成長のアンバランスを生じ、相対的に根の小さい個体となることで高温登熟障害を助長する可能性があることが考えられた。

本実験では被覆尿素を利用したので、出穂期までの施肥窒素の溶出は出穂前高温区の方が多く、このため出穂前高温区では出穂後の窒素吸収量が少なくなったことが葉色や出液速度に直接影響した可能性もあると考えられる。本実験の結果から、出穂前の高温が、地力窒素の発現を早め、地上部の生育を促進して、生育後期に窒素供給量不足を起こしやすくすることが考えられる。登熟期の窒素吸収量が多いと米の食味を低下させるため、生育後期の窒素追肥を抑える傾向にあり、そのことが高温登熟障害を助長している可能性が指摘されている (松村 2005)。

高温による品質低下防止策として様々な技術的対策が行われている。移植時期を遅らせることで登熟期の気温の低下を図ること、籾数が多いと乳白粒の発生が多くなることから適切な穂肥施用を行って籾数を適正化することなど、様々な研究がなされているが (月森 2003, 井上 2003, 寺島 2003, 松村 2005, 森田 2008), 根系の生育を改善することに着目した研究は少ない。狩野ら (1990) は、作土深や還元層出現位置が浅いと根の生理的活力が低下し、乳白米の発生が多いことを報告している。本研究の結果から栄養成長期の高温は根の発育を抑制する傾向にあるので、土づくりや深耕により根群の発達を促進する栽培法をとることが高温登熟障害の軽減に有効であると考えられた。

謝辞: 土壌溶液の採取および土壌溶液中のアンモニア態窒素の測定方法をご指導いただきました宇都宮大学農学部

土壌学研究室の平井英明教授に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 平沢正・荒木俊光・石原邦 1987. 水稻の吸水速度と蒸散速度の相互関係について. 日作紀 56: 38-43.
- 稲田勝美 1967. 水稻根の生理的特性に関する研究, とくに生育段階ならびに根の age の観点において. 農技研報 D16: 19-156.
- 井上健一 2003. 高温のイネ生産への影響と技術的対策-福井県の場合-. 日作紀 72(別 2): 440-445.
- 井上健一・山口泰弘・高橋正樹 2004. コシヒカリの根の発育経過の解析. 日作紀 73(別 1): 130-131.
- 狩野幹夫・幸田浩俊・酒井一・石原正敏・小川吉雄 1990. 平成元年度産水稻の乳白米発生要因の解明. 茨城農試研報 30: 11-24.
- 近藤始彦・石丸努・三王裕見子・梅本貴之 2005. イネの高温登熟研究の今後の方向. 農業技術 60: 462-470.
- 松村修 2005. 高温登熟による米の品質被害-その背景と対策. 農業技術 60: 437-441.
- 森敏夫 1960. 水稻の根と地上部間の相対生長. 日作紀 29: 69-70.
- 森田敏 2005. 水稻登熟期の高温によって発生する白未熟粒, 充実不足および粒重低下. 農業技術 60: 442-446.
- 森田敏 2008. イネの高温登熟障害の克服に向けて. 日作紀 77: 1-12.
- 森田茂紀 2001. 作物形態学講座 7 収量形成の発育形態学. 日作紀 70: 459-462.
- 大谷和彦・青木純子・高齋光延・山口正篤 2003. 栃木県における白未熟粒の発生要因. 日作関東支報. 18: 58-59.
- 佐藤庚 1972. 環境に対する水稻の生育反応. 第1報 栄養生長期の生育に及ぼす気温の影響. 日作紀 41: 388-392.
- 佐藤庚 1974. 環境に対する水稻の生育反応. 第4報 気温・地温が¹⁴C 同化産物の転流・分配に及ぼす影響. 日作紀 43: 410-415.
- 田畑美奈子・飯田幸彦・奥野員敏 2008. 根群の一部切除が水稻玄米の外観品質に及ぼす影響. 日作紀 77: 198-203.
- Tashiro, T. and I.F. Wardlaw 1991. 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.
- 寺島一男 2003. 全国的な高温化がコメ品質に及ぼす影響とその要因の解析. 日作紀 72(別 2): 446-451.
- 月森弘 2003. 島根県における高温のイネ生産への影響と技術的対策. 日作紀 72(別 2): 434-439.
- 津野幸人・山口武視 1987. 水稻光合成の高温低下現象と根の呼吸速度との関係ならびに根の呼吸速度に関与する要因の解析. 日作紀 56: 536-546.

Effects of a High Temperature before Anthesis on Rice Growth and Grain Quality. : Yoshiharu WADA, Mitsuyo OOGAKI and Tomoko KONISHI (*Fac. of Agr., Utsunomiya Univ., 321-8505, Japan*)

Abstract : White back kernel and milky white rice kernel are caused by a high temperature at the ripening stage. The recent tendency of high temperature is not only at the ripening stage but also during the vegetative growth stage. In this study we examined the effect of a high temperature during the vegetative growth stage on shoot and root growth of rice plant, and also on the brown rice quality. Three temperature sets 32/27, 27/22 and 22/17°C of day/night were given to soil grown rice cultivar Koshihikari during 50 days from 1 week after transplanting. Under a high temperature treatment, the growth enhancement was greater in the shoot than in the root, causing the reduction of root/shoot (R/S) ratio. The concentration of ammonium nitrogen in the soil solution was higher in the higher temperature treatment. In a water culture, with the same nutrient concentration, R/S ratio was also reduced by the higher temperature treatment. The number of degraded brown rice, especially white back kernel and milky white rice kernel was increased by the higher temperature during 28 days before anthesis. These plants had a low plant growth rate at the ripening period, mainly caused by a low net assimilation rate. Low breeding rates and accelerated leaf senescence in the high temperature treatment were associated with low R/S ratio caused by high temperature before anthesis.

Key words : High temperature stress, Milky white kernel, Rice, Root/shoot ratio, Soil nitrogen.
