

送風時期が水稻「白未熟粒」発生に及ぼす影響

大谷和彦^{1,2)}・吉田智彦³⁾

(¹⁾ 栃木県農業試験場, (²⁾ 東京農工大学連合農学研究科, (³⁾ 宇都宮大学農学部)

要旨：乳白粒，基白粒，背白粒等を総称した白未熟粒の発生要因を探った。栃木県産米の1等米比率と気象，水稻の生育の解析から，出穂後6～25日の飽差と最大風速，出穂前・後各20日間の気温，出穂前30日間の日照時間，一穂粒数が白未熟粒の発生要因であった。基白粒，背白粒は出穂後6～10日の登熟初期の送風処理により穂上着粒位置にかかわらず多く発生した。一方，乳白粒は出穂後21～25日の登熟中期の送風処理により，上・中位の1次枝梗に多く発生した。枝梗内では弱勢穎花の白未熟粒率が高かった。白未熟粒率を，出穂後0～20日の日平均気温と，出穂後6～25日の $[(100 - \text{最小相対湿度}) \times \text{最大風速}]$ の平均値を用いて推定できた。白未熟粒の発生には品種間差異があった。

キーワード：高温，白未熟粒，送風，日照時間，発生要因，品種間差異。

地球温暖化により気温，地温は長期的には上昇傾向にあり，かつ気温，日照時間，降水量等の変動幅は大きく（原沢2007），生育予測や玄米品質の管理技術は大変難しくなっている。最近，特に1999年全国の水稲作においては，乳白粒，基白粒，背白粒等の発生により，一部の地域を除いて米品質が劣った。近年の低タンパク質米が食味の関係で重視され，生育後半の窒素制限が外観品質の低下をもたらす可能性が指摘されている（寺島ら2001）。栃木県においては，その後も2001年の日照不足，2002年の出穂前の高温，出穂後の乾燥風等により1等米比率がそれぞれ42%，60%と大幅に低下した（大谷ら2003）。長田ら（2004）は胴割れ粒と登熟初期の高温や追肥無施用の関係を，佐藤ら（2005）は登熟期の25.5℃以上の高温による食味低下をテクスチャー特性値で評価できると報告している。これら気象要因による整粒不足は，米を収穫してから分かるのが現状で，整粒不足の軽減技術はもちろんのこと，生育や気温，乾燥風等の気象に応じた整粒不足発生の予測方法の開発も求められる。

なお，農産物検査法の品位では，玄米を整粒，未熟粒，被害粒，着色粒，死米に分け，未熟粒をさらに胚乳が白色不透明になる位置に基づき，乳白粒，心白粒，基白粒，背白粒，腹白粒と青未熟粒，その他未熟粒に区分している（財団法人全国食糧検査協会2002）。寺島ら（2001），森田ら（2005）は乳白粒，心白粒，基白粒，背白粒，腹白粒を総称して白未熟粒と記述している。本報告においても，これらを白未熟粒と総称することとする。

これまで，土壌温度や高水温の玄米品質に及ぼす影響については植木（1960），高村ら（1961）が，日照不足の影響については小谷ら（2006）が，乾燥風の影響に関しては大谷ら（2003）が報告している。水稻の風害に関する報告は，坪井・氷高（1958），今井ら（1979），村松・鴨田（1981）の水分ストレスによる白穂，不稔，薄茶米等の発生に関す

るものがある。石原ら（2005）は穂先端の穎花開花後，1次枝梗の穎花は9～16日後の土壌の乾燥で，2次枝梗の穎花は10～19日後の土壌の乾燥によって乳白粒が発生すると報告している。これまでの松島・真中（1957），長戸・江幡（1965），森田ら（2005）の登熟期の高温による白未熟粒発生に関する研究においては，乳白粒，基白粒，背白粒など個々の発生時期に関する検討や，出穂後の乾燥風が白未熟粒の発生に及ぼす影響の検討が不十分である。そこで，風に注目して，水分ストレスが白未熟粒発生に及ぼす影響，特に発生時期について検討した。今回は，栃木県気象データ，同県産の1等米比率，同県農業試験場水田・ガラス室の栽培試験データを用いて，各要因と白未熟粒発生の関係を検討することにした。本論文では，出穂後の飽差，最大風速，出穂前後の気温・日照時間，一穂粒数が白未熟粒の発生，あるいは乳白粒，基白粒，背白粒の発生に及ぼす影響を明らかにしたので報告する。

材料と方法

1. 出穂期前後の気象要因と白未熟粒率

出穂前後の気象条件と，栃木県産米の1等米比率の関係を解析するため，栃木県産米の1等米比率の年次による変動要因を，重回帰分析法（注：Excel 多変量解析 ver 4.0）により，出穂前20日間の平均日最高気温，出穂後20日間の平均日最低気温，出穂後20日間の平均気温日較差，出穂後6～10日，16～20日あるいは出穂後6～10日，21～25日計10日間の平均飽差，出穂後6～10日，16～20日計10日間の平均日最大風速，出穂前・後各30日間の積算日照時間，同年の栃木県内現地18～23か所の標準的早植栽培コシヒカリの全粒数，1穂粒数，倒伏程度の平均値を説明変数に用いて，F値が1.5を規準とした増減法により抽出した。倒伏程度の判定規準は0（無）～5（甚）の6段階とした。全粒数，倒伏程度を説明変数に入れたのは，これら

第1表 供試品種.

少 (9 品種)	中～多 (36 品種)		
てんたかく	ひとめぼれ	なすひかり	初星
晴れすがた	まなむすめ	ゆめひたち	キヌヒカリ
越南 192 号	奥羽 371 号	コシヒカリ	中部 105 号
群馬 28 号	北陸 195 号	アキニシキ	関東 212 号
う系 123	中部 106 号	月の光	北陸 191 号
う系 128	栃木 12 号	あさひの夢	北陸 194 号
う系 131	う系 119	日本晴	愛知 108 号
う系 132	う系 124	中部 107 号	関東 209 号
う系 135	う系 125	関東 216 号	栃木 12 号
	う系 127	栃木 13 号	う系 130
	う系 129	むさしの 1 号	う系 133
	う系 134	愛知 109 号	う系 136

白未熟粒の程度を 2002 年は場発生した白未熟粒率に基づいて、少ない方から 1/3 を少、それ以上発生したものを中～多の 2 グループに分けた。一部の品種は早植と普通植のデータを含む。

の影響を重回帰分析で消去し、他の気象要因のみによる影響をみるためである。気温、最小相対湿度、日照時間は、宇都宮地方気象台の 1987～2006 年のデータを用いた（注：宇都宮地方気象台、栃木県気象年報 1987～2006）。出穂期は、各年の農業試験場（宇都宮市）で標準栽培した 5 月 6 日移植コシヒカリの値を用いた。

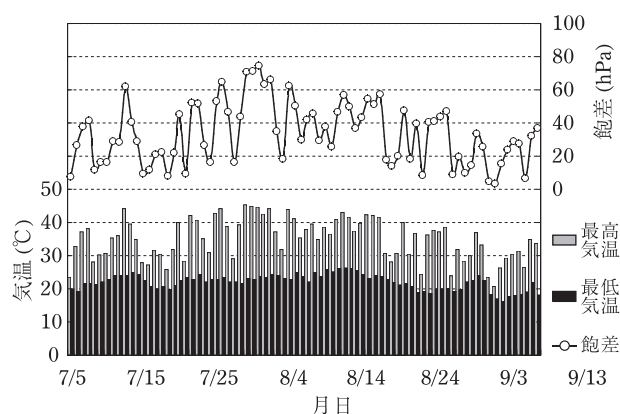
日最大風速は、10 分間平均風速の最大値で示される。宇都宮地方気象台の風速計が市街地の地上 49 m にあるため、農業試験場の地上 4 m にある風速計の 2002 年 7～8 月の観測値との相関関係から求めた (1) 式により補正した（中村ら 1999）。夜間に最大風速を示す日もあったため、11 時～15 時の 10 分間平均風速で最大のものを各日の最大風速として用いた。

最大風速 (m/s) = $0.665 \times (\text{宇都宮地方気象台最大風速値}) - 0.52$ (1)

飽差は、飽和水蒸気圧と飽和水蒸気圧に最小相対湿度を乗じた値の差とし、出穂後 6～10 日、16～20 日あるいは出穂後 6～10 日、21～25 日計 10 日間の各日の平均値として求めた。飽和水蒸気圧は、気温を用いて (2) の Tetens の式（久米ら 2003）により算出した。

$$\text{飽和水蒸気圧 (hPa)} = 6.11 \times \exp \left[\frac{17.50 \times (\text{気温})}{(\text{気温}) + 240.97} \right] \quad (2)$$

1 等米は整粒割合が 70% 以上、形質が 1 等標準品相当のもので、関東農政局栃木農政事務所が品位区分し、栃木県水稻うるち米検査総数 17～20 万 t に対する 1 等米の割合を 1 等米比率として公表したデータから、早植栽培産を対象にした 10 月末におけるものを用いた。検査等級の格下げ理由は、胴割粒、虫害粒、発芽粒を一部含むが、大部分は白未熟粒による整粒不足であった（注：関東農政局栃木農政事務所 1987～2003）。コシヒカリの作付面積割合は 44%（1987 年）～86%（2006 年）であった。



第1図 ガラス室内の気温、飽差の推移。

2. 各気象要因の時期と白未熟粒率

各気象要因の時期の影響を見るため、2002 年農業試験場黒ボク土水田に第 1 表に示す 45 品種を、5 月 8 日に移植し、基肥窒素量は $6 \text{ kg}/10 \text{ a}$ とし、追肥窒素は出穂前 18 日に $4 \text{ kg}/10 \text{ a}$ 施した。一部の品種は 6 月 14 日移植の普通植水稻も用いた。白未熟粒率は品質判定機（RS-2000、静岡精機社）を用いて、玄米 2000 粒当たりの白未熟粒を計測して求めた。45 品種の出穂後 1～5 日、6～10 日、11～15 日、16～20 日、21～25 日、26～30 日、31～35 日、6～25 日の計 8 時期別に飽差と日最大風速を計算し、飽差、日最大風速の時期と白未熟粒率の相関を比較した。さらに、出穂後 10～15 日、5～20 日、0～20 日、0～25 日の日最高気温、日平均気温、日最低気温の平均と白未熟粒率の相関関係を比較した。

3. 白未熟粒率の品種間差異

2004 年にふさおとめ、栃木 13 号、愛知 109 号、コシヒカリ、ひとめぼれ、中部 107 号、なすひかり、ハナエチゼン、初星、栃木 15 号の 10 品種を供試した。農業試験場黒ボク土水田に 5 月 11 日に 1 株 4 本植えて移植し、基肥窒素量は $6 \text{ kg}/10 \text{ a}$ 、追肥窒素は施さなかった。出穂 30 日以上前の 7 月 3 日に $1/5000 \text{ a}$ ワグネルポットに 1 株ずつ株上げし、ガラス室で成熟期まで栽培した。ガラス室の大きさは幅が 7.2 m、奥行き 14 m、高さ 4 m で、床はコンクリート製であった。反復数は 1 品種当たり 3（1 品種 3 株）とし、個体間の地温や水位のばらつきを無くするため、水位をポット地表上 0～5 cm に保ったプール内で栽培した。ガラス室内で大型扇風機を用いて穂に送風し（以下、「送風処理」）、白未熟粒の発生を促した。送風処理は、各品種 3 株、1～2 品種ずつ用いて出穂後 7～13 日の 7 日間、8 時 30 分～16 時 30 分の 8 時間行った。羽根の直径が 0.8 m の大型扇風機を用いて、穂に風速 4 m/s の風が水平に当たるように稲体と大型扇風機の距離を 2～2.5 m に調整した。ガラス室内の気温は、最高気温は外気温より平均で 7.3°C （2～ 13°C ）高く、最低気温は外気温とほぼ同程度になるように天窓と側窓の開閉で調節した。湿度の調整は行わなかった。

第2表 出穂期前後の気温、飽差、風速、日照時間及び生育と1等米比率の重回帰結果。

気象要因, 生育		平均	標準 偏差	全20年間			日照不足年を除く16年間		
				標準 偏回帰 係数	F値	単 相関 係数	標準 偏回帰 係数	F値	単 相関 係数
気温 (°C)	最高 出穂前20日間	30.0	2.0	-1.2	8.1*	-0.45*	-1.7	16.1**	-0.41
	最低 出穂前20日間	22.6	1.1	-	-	-	0.4	4.7	-0.11
	日較差 出穂後20日間	8.0	1.0	-	-	-	-0.7	1.5	-0.57*
飽差 (hPa)	出穂後6~10日, 16~20日	71.8	25.4	-0.9	4.0	-0.11	-1.1	16.7**	-0.48
	出穂後6~10日, 21~25日	72.7	26.1	-1.2	6.5*	-0.22	1.4	12.8*	-0.34
最大風速 (m/s)	出穂後6~10日, 16~20日	3.7	0.8	-	-	-	-0.3	3.0	-0.40
日照 (h)	出穂前30日間	113	38.9	0.9	6.4*	-0.39	1.5	36.6**	-0.05
	出穂後30日間	133	38.4	0.8	4.7	0.07	-	-	-
生育	1穂粒数 (粒/穂)	91	5.3	-	-	-	1.0	25.6**	0.17
	全粒数 (百粒/m ²)	347	28.0	-	-	-	0.3	4.6	-0.07
	倒伏程度	2.8	1.0	0.3	2.5	0.37	-0.3	4.4	-0.01
	1等米比率 (%)	85.7	13.1	-	-	-	-	-	-

検討に用いた期間は1987~2006年の20年間。平均と標準偏差も20年間に対する値。日照不足年は1988, 1989, 1998, 2001年。最高、最低気温、気温日較差、飽差、風速は示されている期間の平均値。日照時間は示されている期間の合計値。倒伏程度は0(無)~5(甚)。規準F値1.5以下の項目は除いた。**, *はF値(F検定)あるいは相関係数に1%, 5%水準で有意性があることを示す。

(第1図)。コシヒカリの出穂後20日間のガラス室内気温の平均値は、日最高気温が38.2°C、日平均気温が29.1°C、日最低気温が24.0°Cであった。気温と湿度はおんどとり(TR-72 UTJ, ティアンドデイ社)を、風速は風速計(Kestrel-4000, ニールセン・ケラーマン社)を用いて計測した。籾を風乾後籾摺機(テストTHU, サタケ社)を用いて玄米に脱ぶし、白未熟粒率は品質判定機(RS-2000, 静岡精機社)を用いて計測し、白未熟粒発生の品種間差異をみた。

4. 風速と白未熟粒率

2005年に3.と同じ方法で大小の扇風機を用いて風速0 m/s, 2 m/s, 4 m/sに設定した送風処理をコシヒカリに施し、風速と白未熟粒率の関係を検討した。コシヒカリは農業試験場黒ボク土水田に5月10日に1株4本植で22.2株/m²の密度で移植し、基肥窒素量は4 kg/10 a施した。3.と同じ方法で株上げしガラス室内で栽培し、出穂前7日に、窒素と加里(20%-0-20%, 肥効調節型窒素肥料50%を含む)をポット当たり0.4 g(窒素4 kg/10 a)追肥した。送風処理は出穂後7~13日の7日間、反復数は1処理当たり2とした。乳白粒は白色不透明の面積から、玄米平面の1/2程度のものを乳白粒(小)、3/4程度のものを乳白粒(大)に分別した。

5. 送風処理時期と白未熟粒率

2006年に3.と同じ方法で、出穂後1~5日, 6~10日, 11~15日, 16~20日, 21~25日, 26~30日, 31~35日, 36~40日の計8時期に、反復数は1処理当たり3としてコシヒカリに5日間送風処理をした。供試したコシヒカリ

は5月9日に4.と同じ方法で移植し、同じ時期にガラス室に株上げし、追肥窒素は施さなかった。無処理は、株上げた水稻を風の影響がないように成熟期までガラス室で栽培した。玄米の着粒位置は、9~12穂が着生する1個体すべての穂について、1穂当たり8~10本着生する1次枝梗を3本ごとに上から上位、中位、下位の3つに分別し、3等分できない時は中位を2あるいは4本とした。次に、松島・真中(1956)の着粒位置、開花順位、穎花の分化発育程度に従い、各1次枝梗内の先端を1番粒、最下位から先端に向かって2~6番粒として分別した。2次枝梗も同様に先端を1番粒、最下位粒を2番粒、その上を3番粒とした。3次枝梗はなかった。着粒位置別に手で脱穀し、卓上籾すり器を用いて玄米に脱ぶし、品質判定機を用いて白未熟粒率を計測した。品質判定機の分光比(玄米の反射光の赤色光量/緑色光量×100)が69以上108未満で、光透過率(透過光量/反射光量×100)が100以下の玄米を白未熟粒とした。さらに白未熟粒として分画された粒を、肉眼で未熟粒判定基準(財団法人全国食糧検査協会2002)に準じて、乳白粒、基白粒、背白粒に判別した。基白と背白が同一玄米に発生している時は、白色不透明部分の面積が大きい方に分別した。乳白粒と心白粒の区別は行わなかった。

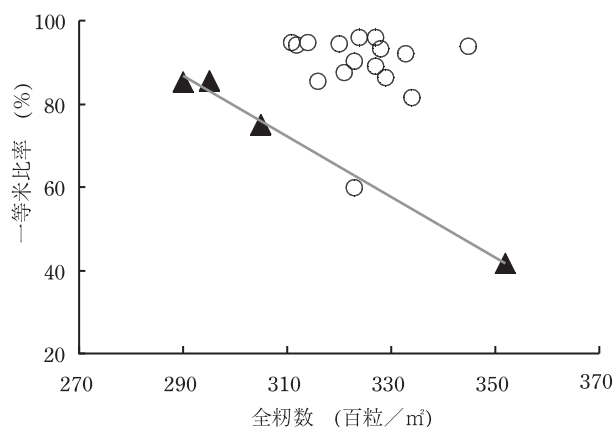
6. 着粒位置別の玄米千粒重と白未熟粒率

2006年に出穂後11~15日のコシヒカリに3.と同じ方法で5日間送風処理し、着粒位置別の玄米千粒重と白未熟粒率の関係を調べた。供試したコシヒカリは農業試験場黒ボク土水田に5月9日に1株4本植で22.2株の密度で移植した。基肥窒素量は0, 2, 4, 6 kg/10 aの4段階とし、出

穂前10日に追肥窒素量を0, 2, 4 kg/10aの3段階に変えて生育させた。併せて、基肥として窒素2 kg/10aを施し、窒素を4 kg/10a追肥した水稻（以下、基肥窒素2 kg/10a + 追肥窒素4 kg/10a）と基肥窒素4 kg/10aを施し窒素を追肥しなかった水稻（以下、基肥窒素4 kg/10a + 無追肥）を用いて、白未熟粒発生の多少と玄米千粒重のばらつきを比較した。

7. 白未熟粒率の推定

2002年に農業試験場黒ボク土水田で栽培した第1表に示す45品種に発生した白未熟粒を、品質判定機（RS-2000, 静岡精機社）で計測し、日平均気温、 $\{(100 - \text{最小相対湿度}) \times \text{最大風速}\}$ を用いて重回帰分析法（注：Excel多変量解析 ver 4.0）により白未熟粒率の推定式を導き出した。平均気温、最小相対湿度及び最大風速の間に相互作用は認められなかった。併せて2002年県内現地試験の那須塩原市



第2図 全粒数と1等米比率の関係。

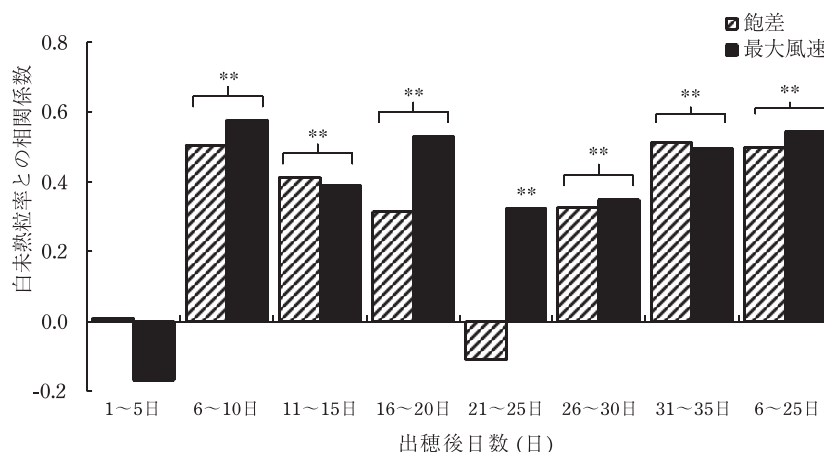
▲は日照不足年1988, 1989, 1998及び2001年を示す。1988, 1989, 1998年の出穂前30日間の積算日照時間は73～98時間、2001年の出穂後30日間の積算日照時間は84時間で、全20年間の各平均値よりそれぞれ15～49時間少ない。○はそれ以外の16年。

2か所、大田原市、那珂川町、日光市、塩谷町、那須烏山市、高根沢町、宇都宮市3か所、芳賀町、真岡市、鹿沼市、西方町、小山市2か所、佐野市の計18か所で発生したコシヒカリとあさひの夢の白未熟粒の発生率を上述の品質判定機を用いて測定し、推定式の精度を検討した。平均気温と最大風速は最寄りの宇都宮地方気象台観測所の測定データを、最小相対湿度は県中部（宇都宮市）の宇都宮地方気象台データを用いた。現地試験18か所の出穂期は7月30日～8月29日、白未熟粒率は1.7～22.3%、倒伏程度は前述の6段階評価で0～4.5、全粒数は26～35千粒/m²であった。

結 果

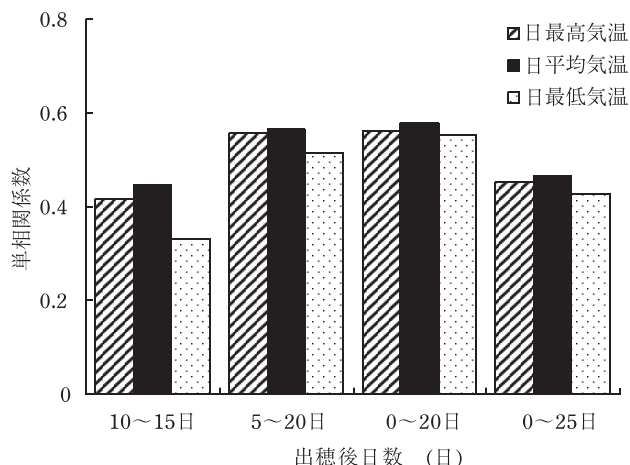
1. 出穂期前後の気象要因と白未熟粒率

1987～2006年20年間の出穂前20日間の最高気温、出穂後6～10日、21～25日計10日間の平均飽差、出穂前30日間の積算日照時間は、重回帰分析を用いた検討から1等米比率の変動に及ぼす影響が強い気象要因といえた（第2表）。全粒数と、出穂前20日間の平均日最高気温、出穂前30日間の積算日照時間の相関関係はやや強いが（表略）、1等米比率に及ぼす影響は弱かった（第2表）。1988, 1989, 1998, 2001年の日照不足年においては、全粒数が多いほど1等米比率が低下し（第2図）、日照不足年は全20年間との傾向が異なった。そこで日照不足年を除いて重回帰分析を行ったところ、出穂前20日間の平均日最高気温、出穂後6～10日、16～20日及び出穂後6～10日、21～25日計10日間の平均飽差、出穂前30日間の積算日照時間、1穂粒数は1等米比率の変動に及ぼす影響が強い要因であることが分かった（第2表）。出穂前20日間の平均日最高気温、出穂後6～10日、16～20日計10日の平均飽差は1等米比率との相関関係も強かった（第2表）。出穂後20日間の平均気温日較差と出穂後6～10日、16～20日計10日間の平均最大風速は1等米比率の変動に及ぼす影響の弱い気象要因であったが相関関係は強かった（第2表）。



第3図 飽差、最大風速と白未熟粒率の相関関係。

第1表の45品種を供試。**は相関関係が1%水準で有意なことを示す。



第4図 日最高、日平均、日最低気温と白未熟粒率の相関関係。
第1表の45品種を供試。いずれの相関係数も1%水準で有意性があつた。

第3表 送風処理による白未熟粒率の品種間差異。

品種名	白未熟粒率 (%)
ふさおとめ	7.4 a
栃木13号	10.3 ab
愛知109号	11.4 ab
コシヒカリ	13.4 abc
ひとめぼれ	13.8 abc
中部107号	16.0 abc
なすひかり	19.8 bcd
ハナエチゼン	24.4 cde
初星	28.3 de
栃木15号	34.7 e

同じアルファベットには5%水準で有意差がないことを示す (チューキーの多重比較)。

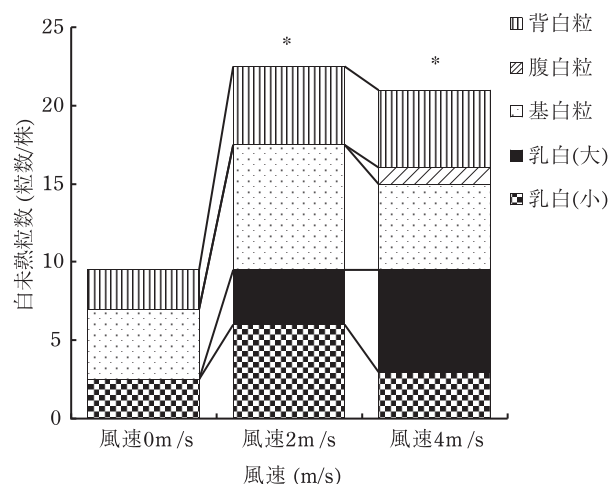
2. 各気象要因の時期と白未熟粒率

飽差、最大風速について、時期と白未熟粒発生との関係を第3図に示した。出穂後6日から35日までの5日間ごとの最大風速と白未熟粒率の間には正の相関関係が認められた。特に、出穂後6~10日、出穂後16~20日、出穂後6~25日、出穂後31~35日の平均最大風速と白未熟粒の相関関係が強かった。出穂後6~10日、出穂後6~25日、出穂後31~35日の飽差と白未熟粒率の間にも正の相関関係が認められた。

日最高気温、日平均気温、日最低気温の平均値と白未熟粒率の関係の相関関係はいずれも有意であった (第4図)。しかし、これらの関係の出穂後の期間による違いは大きくなかった。

3. 白未熟粒率の品種間差異

送風処理による白未熟粒発生には、品種間差異が認められた。供試した10品種の中で白未熟粒の発生量が最も少



第5図 風速と白未熟粒数。

*は風速0 m/sに比べて5%水準で有意差があることを示す (t検定)。

ないのはふさおとめで、多いのは栃木15号であった (第3表)。コシヒカリとひとめぼれの白未熟粒率は両品種の中間にあつた。これは石崎 (2006) の温水かけ流しビニルハウス等を用いたふさおとめ、コシヒカリ、福井ら (2004) のふさおとめ、ひとめぼれ、山川ら (2002) のふさおとめ、ひとめぼれ、初星、飯田ら (2002) のひとめぼれ、初星の結果と一致しており、送風処理による白未熟粒率の品種間差評価が、他の検定方法による評価とほぼ一致していた。

4. 風速と白未熟粒率

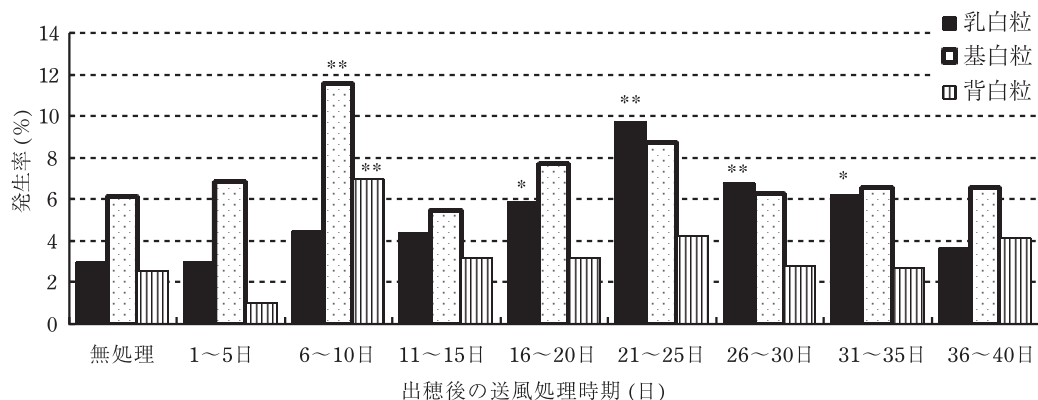
風速2 m/s以上の風を出穂後7~13日の7日間、毎日8時間ずつ稲体に送ると白未熟粒の発生が多くなった (第5図)。風速2 m/sと4 m/sの間に白未熟粒率の差は無いが、風速4 m/sの方が乳白粒 (大) の割合が高かった。

5. 送風処理時期と白未熟粒率

乳白粒は、出穂後21~25日の5日間送風処理した水稻に最も多く発生した (第6図)。送風処理による乳白粒の発生率が、無処理に比べて有意に高かったのは出穂後16~20日、21~25日、26~30日、31~35日で、長期間にわたっていた。出穂後21~25日処理では乳白粒は、上位、中位の1次枝梗に多く発生していた (第4表)。出穂期に送風処理した籼には不稔籼が29%、薄茶米が16%発生し、整粒割合は低かった (表略)。

基白粒は、出穂後6~10日に送風処理したものに多く発生した (第6図)。基白粒の発生割合の着粒位置による違いは下位2次枝梗は低く、他の部位間には違いが認められなかった (第4表)。

背白粒は、基白粒と同じ出穂後6~10日の時期に送風処理した水稻に多く発生した (第6図)。着粒位置別の背白粒発生割合は下位2次枝梗は低く、他の部位間の差は小さかった (第4表)。



第6図 送風処理時期と乳白粒，基白粒，背白粒発生率。

無処理は株上げし，ガラス室で風の影響がないように栽培した。**, *は無処理に比べて1%，5%水準で有意差があることを示す（t検定）。

第4表 送風処理による着粒位置別の乳白粒，基白粒，背白粒の発生割合。

着粒位置	乳白粒 (%)	基白粒 (%)	背白粒 (%)
上 1次	2.02**	2.55**	1.01
位 2次	1.77*	2.30**	1.66*
中 1次	3.14**	2.18**	1.07
位 2次	1.46*	1.53**	1.36*
下 1次	1.27	2.67**	1.81**
位 2次	0.26	0.36	0.07

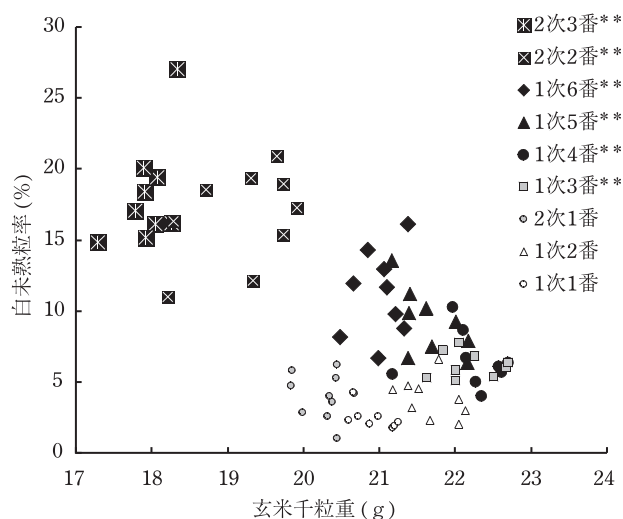
乳白粒の送風処理時期は出穂後21～25日，基白粒と背白粒は出穂後6～10日。各白未熟粒率は，全粒に対する割合。**, *は下位2次枝梗の値に比べて1%，5%水準で有意差があることを示す（t検定）。

乳白粒の発生は基白粒，背白粒の発生時期より遅いが，基白粒，背白粒より長期間にわたって高い発生率を示した。基白粒と背白粒の発生割合の着粒位置による違いは類似していた（第4表）。発生率は，基白粒が最も多く，次いで乳白粒，背白粒の順に多かった（第6図）。

6. 着粒位置別の玄米千粒重と白未熟粒

1次枝梗3～6番粒と2次枝梗2～3番粒の白未熟粒率は，1次枝梗1番粒に比べて高い傾向があった（第7図）。白未熟粒率が高かった（基肥窒素4kg/10a＋無追肥）の水稲は，白未熟粒率が少なかった（基肥窒素2kg/10a＋追肥窒素4kg/10a）の水稲に比べて，玄米千粒重が軽く，玄米千粒重のばらつきは大きかった（第5表）。

1次枝梗内の着粒位置に着目すると，白未熟粒率は，上位の1次枝梗の1～6番粒間に差は認められなかった（第8図）。一方，中，下位の1次枝梗においては，着粒位置の番号が大きく，いわゆる弱勢穎花になるほど白未熟粒率は高まった。2次枝梗においては，上，中，下位いずれの位置においても，1から3番粒の順に白未熟粒率が高まった。



第7図 着粒位置別の玄米千粒重と白未熟粒率。

送風処理時期は出穂後11～15日。**は1次枝梗1番粒の白未熟粒率に比べて1%水準で有意差があることを示す（t検定）。

7. 白未熟粒率の推定

2002年には場栽培した45品種に発生した白未熟粒率に基づいて，少ない方から1/3を少，それ以上発生したものを中～多と2グループに分けた（第1表）。最小相対湿度と最大風速の時期は，第3図と第6図に基づいて出穂後6～25日とし，気温は第4図に基づいて出穂後0～20日の日平均気温の平均値を用いた。そして各グループごとに白未熟粒率の推定式を{(100－最小相対湿度)×最大風速}と日平均気温を用いて(3)，(4)式のように求めた。

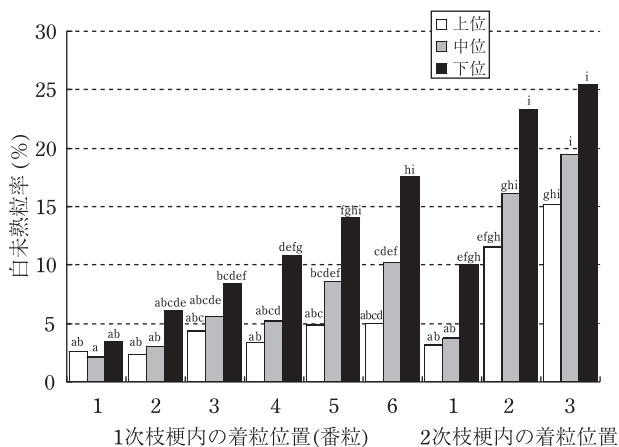
$$\begin{aligned} &\text{少品種の} \\ &\text{白未熟粒率} = 0.794X_1 + 0.033X_2 - 22.8 \quad (R^2 = 0.72) \\ &(\%) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\text{中～多品種の} \\ &\text{白未熟粒率} = 1.80X_1 + 0.052X_2 - 44.8 \quad (R^2 = 0.55) \\ &(\%) \end{aligned} \quad (4)$$

第5表 窒素肥培管理と着粒位置による白未熟粒率の多少と玄米千粒重の変動.

窒素肥培管理 基肥－追肥 (kg/10a)	白未熟 粒率 (%)	玄米千粒重 (g)								
		1次枝梗						2次枝梗		
		1番	2番	3番	4番	5番	6番	1番	2番	3番
玄米	2-4	6.4	21.3	22.5	23.1**	22.8*	22.1	21.1	20.6	19.6**
千粒重 (g)	4-0	9.1*	21.2	22.0*	22.1**	22.3**	21.6	21.3	20.5*	18.8**
変動	2-4	—	1.2	4.5	3.1	2.0	1.6	2.6	2.7	9.2
係数 (%)	4-0	—	2.5	4.3	3.7	3.3	2.8	4.5	3.7	7.8

白未熟粒率は全玄米の平均値. 株当たり全粒数は窒素肥培管理 2-4 が 733 粒, 4-0 が 700 粒で有意差は無かった. **, * は 1 次枝梗 1 番粒の玄米千粒重に比べて 1%, 5% 水準で有意差があることを示す (t 検定).



第8図 着粒位置別の白未熟粒率.

送風処理時期は出穂後 11~15 日. 同じアルファベットには 1% 水準で有意差がないことを示す (チューキーの多重比較).

X_1 : 出穂後 0~20 日の日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$) の平均値.

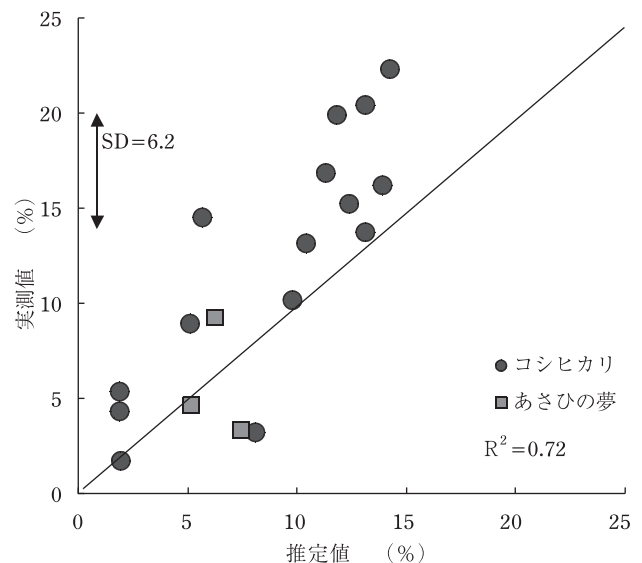
X_2 : 出穂後 6~25 日の $\{(100 - \text{最小相対湿度}) \times \text{最大風速}\} (\% \times \text{m/s})$ の平均値.

R は自由度修正済み重相関係数

中~多品種の推定式を用いて推定した白未熟粒率と, 2002 年県内現地ほ場で発生したコシヒカリ, あさひの夢の白未熟粒率は, 発生率が低いときは一致し, 発生率が高くなると推定値は実測値よりも低くなったが, 推定値と実測値は直線の関係にあった (第9図).

考 察

白未熟粒の発生要因には, 出穂前・後各 20 日間の気温, 出穂後 6~25 日の 20 日間の飽差と最大風速による水分ストレス, 出穂前の日照時間, 一穂粒数があつた. 藤部ら (2003) は, 夏季午後に関東平野で「広域海風」風速 2.5~5.0 m/s の乾燥した南風が, 23 年間で 236 例観測されたと報告している. 高木 (2004) は, 京都亀岡盆地は南北に細長く中央に河川が流れ, 風の通り道になり, 陸と海の温度差が大きい日には強風の日が多いと報告している. 本報告における白未熟粒が多発生した 2002 年 8 月には, 最



第9図 白未熟粒率推定値と実測値との関係.

実測値は 2002 年現地試験コシヒカリ 15 か所, あさひの夢 3 か所を用いた.

大風速 4 m/s 以上の日が 12 日あり, その内の 6 日は南~南東風であった. 本報告では風の時期に特に注目した.

送風処理によって乳白粒, 基白粒, 背白粒の発生する時期は違っていた (第6図). 乳白粒の発生は出穂後 23 日を中心とした比較的長い期間続いた. この時期の乳白粒の発生が多い着生位置は, 上位, 中位の 1 次枝梗であった (第4表). 基白粒, 背白粒は出穂後 6~10 日の乳白粒より早い時期の, そして比較的短い期間の送風処理によって多く発生した (第6図). 基白粒, 背白粒は, 下位 2 次枝梗を除くどの位置の玄米にも発生していた (第4表). 木戸・梁取 (1968) は, 腹白粒, 基白粒は開花時期が早い強勢穎花に, 乳白粒は開花時期が遅い弱勢穎花に多く発生し, 米粒生育ステージの違いや同化産物の競合により種々の不透明部を形成すると報告している. 松本・齋藤 (2002) は, ポットに株上げした水稻を, 出穂後 5~20 日を 5 日間づつ処理期間を区切り温度勾配チャンバーを用いて高温処理した結果, 乳白粒は出穂後 10~15 日, 背白粒は出穂後 15~20 日の高温で発生すると報告している. 長戸・江幡 (1965) は, 乳白粒は米粒の透明化が進行している時の障害によって起

こり、基白粒と背白粒の発生は酷似していること、そして、乳白粒、基白粒、背白粒とも出穂後0~30日の高温処理の水稻に最も発生するが、乳白粒、背白粒は出穂後0~10日>11~20日>21~30日の高温処理の順に多く発生し、基白粒は出穂後0~10日≒11~20日>21~30日の高温処理で発生することを報告している。本報告では、自然条件の発生と送風処理の結果から、基白粒、背白粒の発生時期は乳白粒より早く、乳白粒は比較的長い期間にわたっていた。乳白粒の発生時期は、長戸・江幡(1965)、松本・齋藤(2002)の結果より遅く、基白粒の発生時期は長戸・江幡の結果よりやや早かった。

松田(2004)は登熟初~中期の高温により同化産物の輸送経路である珠心表皮が早く退化し、森田ら(2005)は高夜温による玄米千粒重の低下は胚乳細胞サイズが小さくなることによると報告している。本報告における着粒位置別の白未熟粒率と玄米千粒重の結果から、出穂後11~15日の送風処理は、強勢穎花と弱勢穎花間で同化産物の競合により玄米千粒重の低下をもたらしたものと考えられる。

白未熟粒の発生程度には品種間差異があり、出穂前・後の気温、最小相対湿度及び最大風速を用いて、白未熟粒率の予測方法を解析した。温暖化により今後も気温は上昇傾向にあり、年あるいは一栽培期間内の気象変動も大きくなることが予想される。本報告で明らかにした送風処理により発生する白未熟粒の種類は玄米発育段階で異なることや、弱勢穎花で白未熟粒率が多く発生することから、胚乳細胞の増大や細胞内デンプンの蓄積の競合が白未熟粒発生に関与していることが示唆される。今後、白未熟粒発生の少ない水稻品種の育成、水稻の生育に応じたきめ細かい予測法を用いた白未熟粒の軽減技術を開発することにより、安定した品質の米生産ができると考える。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、増渕清一技査、伊澤由行主査、藤井真弓技師から多大な協力と供試材料の提供をいただき、栃木県農業環境指導センター所長山口正篤、石原邦博士からは研究手法の教示をいただいた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 藤部文昭・瀬古弘・小司貞教 2003. 関東平野における夏季高温日午後の降水分布と地上風系との関係. 天気 50: 777-786.
- 福井清美・桑原浩和・佐藤光徳 2004. 水稻品種系統の高温登熟性について. 九州農業研究 66: 16.
- 原沢英夫 2007. 地球温暖化の影響研究の最前線. 気候温暖化研究成果発表会 4-9.
- 飯田彦彦・横田国夫・桐原俊明・須賀立夫 2002. 温室と高温年の圃場で栽培した水稻における玄米品質低下程度の比較. 日作紀 71: 174-177.
- 今井秀明・石原信一郎・林征三 1979. フェーン気象下における稲体の水分変化と登熟障害に関する研究. 富山農試報 10: 17-25.
- 石原邦・堀口友子・水野五月・高橋久光・在原克之・志和地弘信 2005. 水稻「高温障害」による乳白粒等の発生要因の検討-体内水分と窒素濃度に着目して(2003年, 2004年). 日作紀 74(別1):

- 122-125.
- 石崎和彦 2006. 水稻の高温登熟性に関する検定方法の評価と基準品種の選定. 日作紀 75: 502-506.
- 木戸三夫・梁取昭三 1968. 腹白, 基白, 心白状乳白, 乳白米の穂上における着粒位置と不透明部のかたちに関する研究. 日作紀 37: 534-538.
- 小谷俊之・松村洋一・黒田晃 2006. 出穂前後の遮光処理が水稻品種「ゆめみずほ」の収量および品質に及ぼす影響. 石川農試研報 27: 1-9.
- 久米篤・大槻恭一・熊谷朝臣・小川滋 2003. 生物環境物理学の基礎 第2版. 森北出版, 東京. 42-45.
- 松田智明 2004. イネの登熟期の子房における転送系の構造と貯蔵物質の蓄積. 日作紀 73(別1): 300-301.
- 松本靖・齋藤弘文 2002. 水稻は出穂後10~15日の高温により白未熟粒の発生が増加する. 東北農業研究成果情報 平成14年度: 177-178.
- 松島省三・真中多喜夫 1956. 水稻幼穂の発育経過とその診断, 全茎を対象とした幼穂の発育経過とその基準及び各発育段階の特徴. 農業技術協会, 東京. 26-31.
- 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: 203-206.
- 森田敏・松村修・三ツ井敏明・福山利範・田畑美奈子・石崎和彦・近藤始彦・石丸努・三王裕見子・梅本貴之 2005. 特集: 稲の高温登熟性に関する研究の進展1~6. 農業技術 60: 437-470.
- 村松謙生・嶋田福也 1981. 水稻のフェーン害に関する研究. 北陸農試研報 23: 19-56.
- 長田健二・吉永悟志・福田あかり・滝田正・寺島一男 2004. 米粒の胴割れ発生程度と登熟期の気象条件との関係. 東北農業研究成果情報 平成16年度: 55-56.
- 長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期の高温が穎果の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀 34: 59-66.
- 中村修・宮下康一・植松康・山田大彦 1999. 都市域における平均風速の鉛直分布の検討. 社団法人日本建築学会, 東京. 105-106.
- 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.
- 佐藤大和・陣内陽明・尾形武文・内川修・田中浩平 2005. 水稻の高温登熟条件下における食味評価指標形質. 九州農業研究 67: 10.
- 高木淳子 2004. 理科実験実習講座資料. 京都地学教育研究会. 1-3.
- 高村泰雄・竹内史郎・長谷川浩 1961. 土壌温度が作物の生育に及ぼす影響. 日作紀 29: 195-198.
- 寺島一男・齋藤祐幸・酒井長雄・渡部富雄・尾形武文・秋田重誠 2001. 1999年の夏期高温が水稻の登熟と米品質に及ぼした影響. 日作紀 70: 449-458.
- 坪井八十二・氷高信雄 1958. 水稻の風害に関する研究, 不受精の原因について. 日作紀 27: 207-209.
- 植木健至 1960. 暖地における水稻生育に及ぼす灌漑水温の影響. V. 幼穂発育に及ぼす高水温の影響-特に根の発育との関連において-. 日作紀 29: 75-78.
- 山川智大・神田幸英・村上高敏・宮本啓一 2002. 短日処理を利用した水稻高温耐性の検定法と基準品種選定. 関東東海北陸農業研究成果情報 平成14年: 366-367.
- 財団法人全国食糧検査協会 2002. 農産物検査ハンドブック/米穀篇. 日本農民新聞社, 東京. 157-201.

Effects of the Period of the Ventilation on Occurrence of "Chalky Grains" in Rice : Kazuhiko OYA^{1) 2)} and Tomohiko YOSHIDA³⁾

(¹⁾Tochigi Agr. Exp. Stn, Tochigi 320-0002, Japan ; ²⁾Tokyo Univ. of Agr. and Tech. ; ³⁾Utsunomiya Univ.)

Abstract : Factors of occurrence of chalky grains including milky white rice grains, white-based rice grains and white-back grains in rice, were studied. From the analysis of the relationship with the percentage of first class grade rice produced in Tochigi prefecture, the weather conditions and the growth of rice, the factors causing occurrence of chalky grains in rice were found to be the saturation deficit and ventilation from 6 to 25 days after heading, the temperature for 20 days before and after heading, the daylight hours for 30 days before heading, and the number of spikelets per panicle. When kept under ventilation for 6-10 days after heading, white-based rice grains and white-back rice grains occurred in every position on the panicle. On the other hand, when kept under ventilation for 21-25 days after heading, milky white rice grains occurred on the primary rachis-branch at top and medium positions. The rate of chalky grains was high on inferior spikelets. The rate of chalky grains in rice could be estimated from the mean temperature from 0 to 20 days after heading and $[(100 - \text{minimum humidity}) \times \text{maximum wind velocity}]$ from 6 to 25 days after heading. The occurrence of chalky grains varied with the cultivar.

Key words : Chalky grains in rice, Day light hours, Difference among cultivars, Factors of occurrence, High temperature, Ventilation.
