

## (1) 高温障害の発生の仕組み

登熟初期の高温は、胚乳のでんぷん合成酵素の活性を低下させ、でんぷん合成機能に直接障害をもたらす可能性がある。一方、高夜温に伴う呼吸の増大、日射不足、窒素含量の低下、水不足、倒伏等はでんぷん合成の基質になる稲体中の光合成産物（糖類）の穂への転流を減じ、養分需給の不均衡が生じるため高温障害の発生が助長されると考えられている。

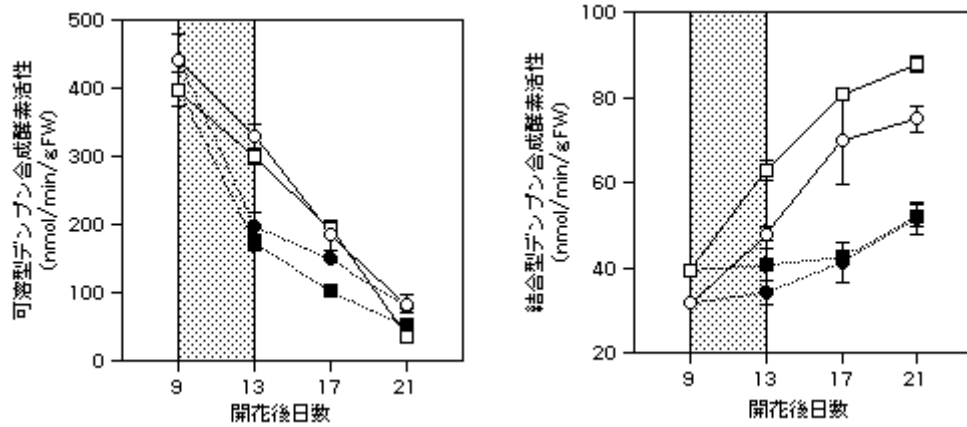


図 開花後9～13日の高温処理が酵素活性に及ぼす影響（東北農試：平成10年）

—○— あきたこまち      —□— ササニシキ  
—●— あきたこまち高温      —■— ササニシキ高温

開花後9日から13日の間に昼温35℃、夜温30℃の高温処理を行うとイネ胚乳のでんぷん合成酵素活性は著しい低下を示し、酵素活性は常温に戻したとしても回復しない（図1）。この結果、胚乳のでんぷん合成機能に障害が生じ、胚乳でんぷんの蓄積が停滞している可能性がある。

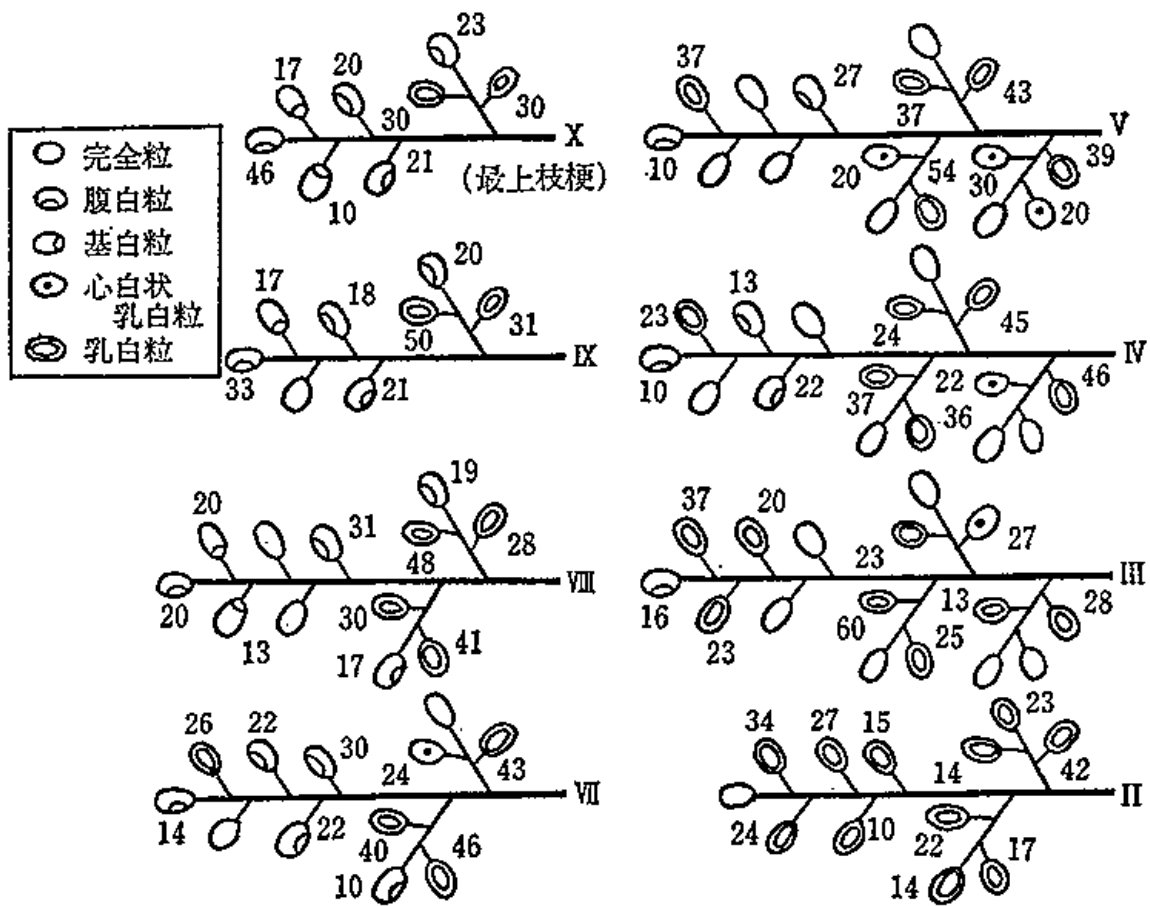


図2 腹白未熟粒，基白粒，乳白粒等の穂上位置  
(木戸・梁取，1968)

I, II, III・・・穂首から数えた枝梗番号  
25, 62, 59・・・各未熟粒の発生量 (%)

一方，高夜温に伴う呼吸の増大，日射不足，窒素含量の低下，水不足，倒伏等はでんぷん合成の基質になる稲体中の光合成産物（糖類）の穂への転流を減少させる。このため，高温下での玄米の急激な生長に伴う強い養分要求に対し，栄養器官からの養分の供給量の不足が生じる。

これらの結果，胚乳の一部にでんぷん集積の不良な箇所ができ，不透明化する。胚乳の中ででんぷん集積の不良な位置やその大きさに応じ，腹白，心白，背白，乳白の違いが生じる。高温を受ける時期，もみの穂上位置，成熟順序，品種特性等によってその種類が変化する（図2）。また，白未熟粒は冷害等や早い段階で倒伏した場合，干ばつにより水が不足した時にも発生することがあるので注意が必要である。

## (2) 温度条件

白未熟粒は登熟初中期（出穂5～15日後，最終玄米重の約4分の1程度の粒重となったステージ）の高温により発生しやすい。

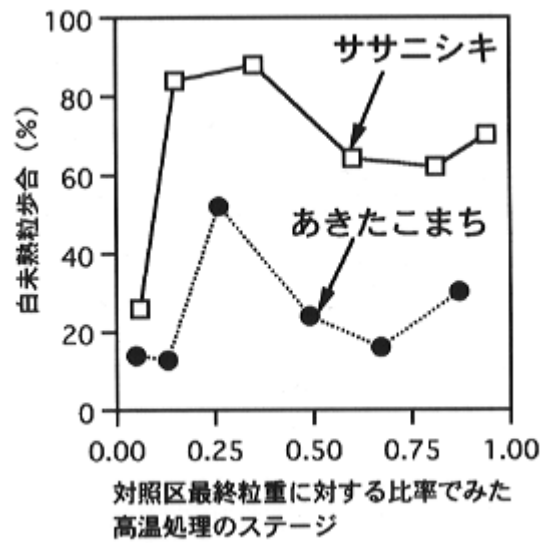


図1 時期別高温処理（昼35°C/夜30°C）が白未熟粒発生に及ぼす影響（東北農試）

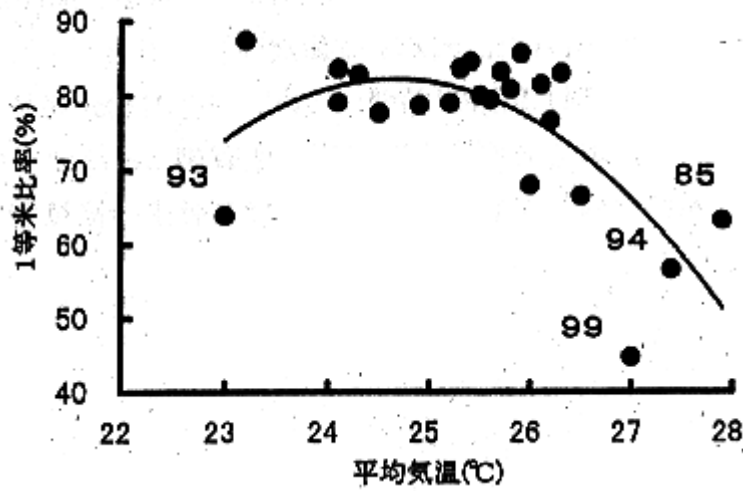


図2 8月の気温と1等米比率の関係（新潟県：昭和52年～平成11年）  
 図中の数字は高温もしくは低温年次を示す。

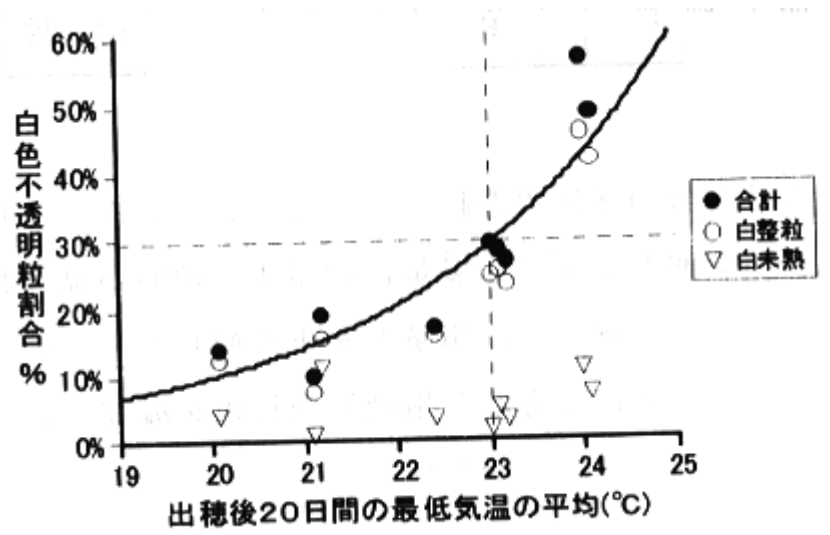


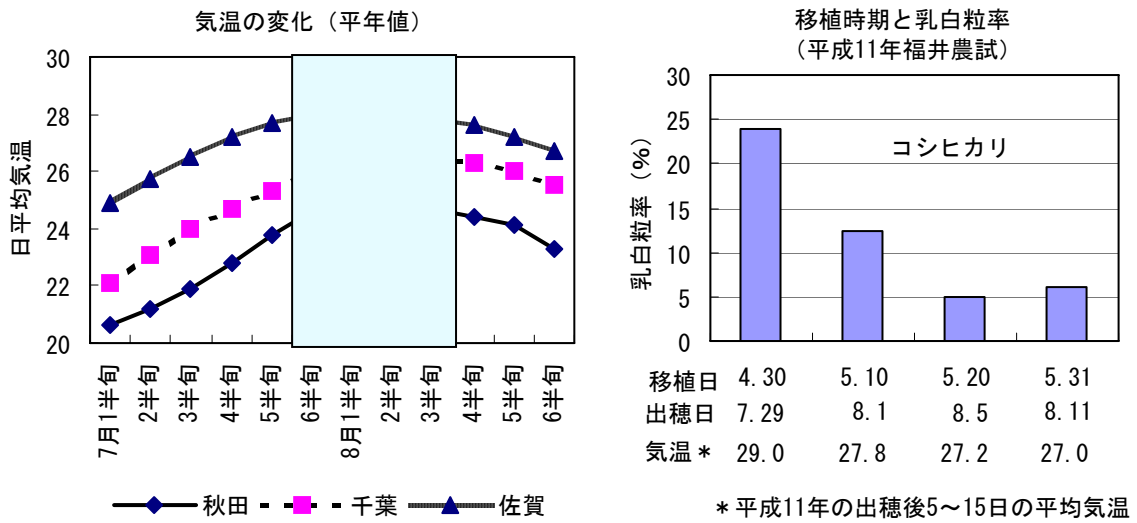
図3 出穂後20日間の最低気温と白未熟粒発生の関係  
(岩手県盛岡市～一関市：平成11年)

## 解説

白未熟粒の発生は開花 5～15日後の登熟の初中期の高温条件で助長される。粒重で言えば最終粒重の約 25%まで登熟が進んだ時期の感受性が高い(図 1)。出穂後 20日間の平均で最高気温 32℃、平均気温 27～28℃、最低気温 23～24℃を超える高温条件となると 1等米比率の著しい低下が生じる(図 3)。図 2は新潟県における 1等米比率の年次変動を 8月の気温との関係で整理したものである。白未熟粒の発生割合と 1等米比率の低下には斑点米カメムシ等の要因も関与するので必ずしも強い相関はないが、8月の平均気温が 27℃を上回ると著しく 1等米比率が低下することが示されている。ただし、1993年のような低温年においても 1等米比率は低下するので留意する必要がある。なお、昼夜の温度条件については、一般的に夜温(最低気温)の影響が大きいとみられている。しかしながら、障害型冷害に関する研究と比較して蓄積が少なく、今後高温に対する感受性が高い生育ステージや限界温度について詳細な検討が必要である。

### (3) 移植日

移植時期が早いと白未熟粒が発生しやすい生育ステージに高温に遭遇する確率が高い。



#### 解説

前述のように出穂後5～15日が最も高温障害に対する感受性が高い。我が国の日平均気温（1961-1990：30年間の平均）の年変化を秋田市，千葉市，佐賀市の3地点について見ると7月26日から8月15日までの期間に最高に達している（左図）。また，他の地点も平年値で見ると傾向は同じである。

福井農試の平成11年度の試験結果では，移植日を4月30日から5月31日まで4段階で乳白粒率の変化を見たところ，移植日が早いほど出穂後5～15日の平均気温が高くなり乳白粒が多くなった（右図）。

ただし，年最高気温が右図の範囲に入るのはあくまで平年値に基づく確率を議論しているに過ぎないため，注意が必要である。例えば，平成12年の群馬・埼玉県では9月1半旬に異常高温を記録し，この時期に高温感受性が高くなる生育ステージに当たった麦作の後（おおよそ6月中旬）に移植した水田の被害が早期栽培（おおよそ5月中旬移植）よりも多くなった。

#### (4) 日射条件

登熟期の低日射条件で白未熟粒の発生は助長される。

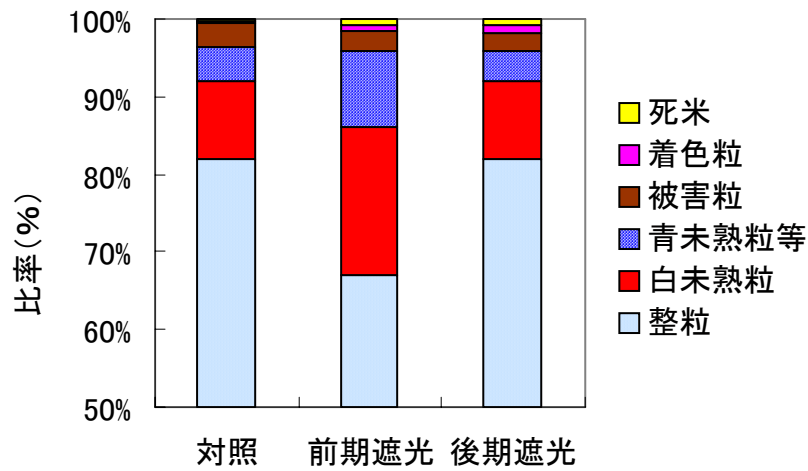


図1 出穂後1週間後（前期処理）と3週間後（後期処理）からそれぞれ2週間の遮光処理（約40%の照度減）が玄米の外観品質に及ぼす影響（岩手県農試・東北農試）

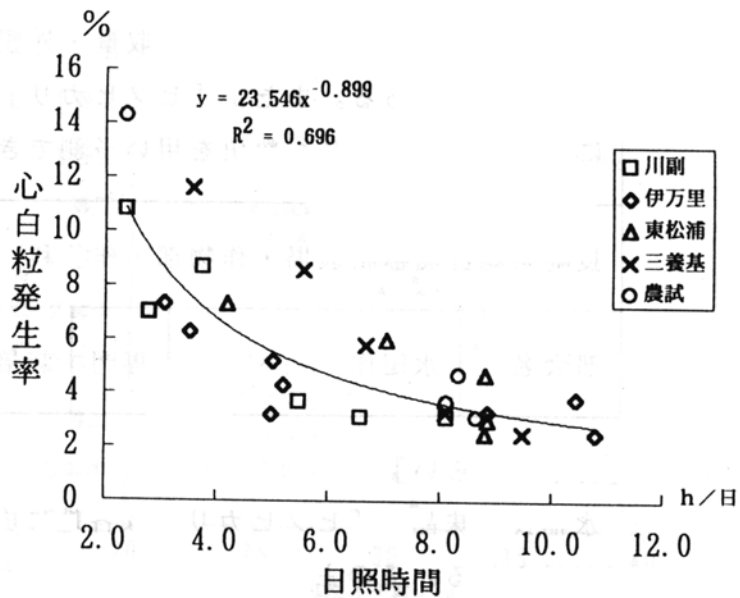


図2 出穂期の異なる水稻の出穂6～11日後の日日照時間と心白粒発生率の関係（平成9年：佐賀県農試）

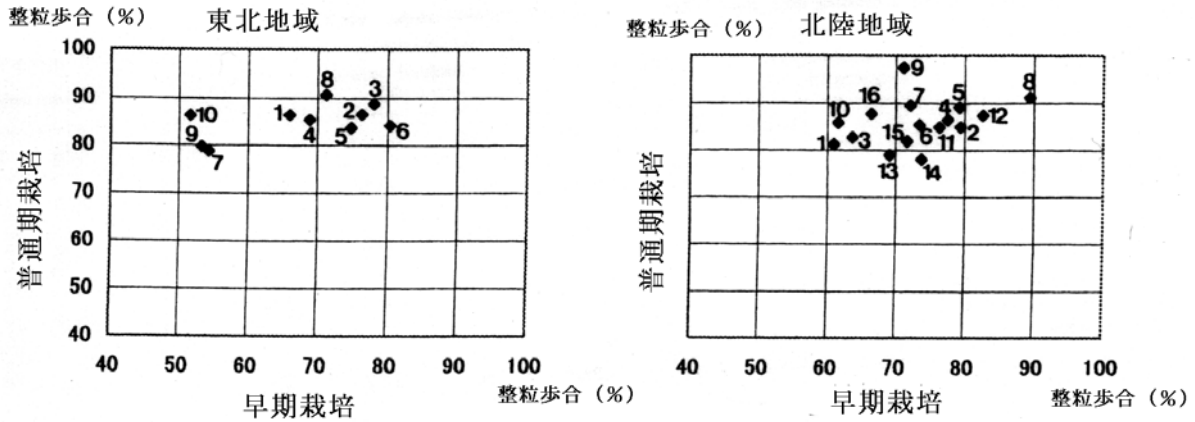
注) 川副，農試は佐賀気象台，東松浦・伊万里・三養基はそれぞれ枝去木・伊万里・久留米のアメダスデータを使用した。

## 解説

日照不足により白未熟粒の発生が助長される。図1は出穂後1週目から3週目にかけての登熟前半と3週目から5週目にかけての登熟後半にそれぞれ40%日射量を人為的に低下させた場合の外観品質を示している。その結果、前半の遮光処理により白未熟粒の発生比率が高まる傾向が認められる。図2は北部九州における平成9年に多発した心白粒の発生におよぼす出穂6～11日後の日照時間の影響を表している。この期間の1日当たり日照時間が少ないほど心白粒の発生は多く、4時間以下になると急激に増加している。

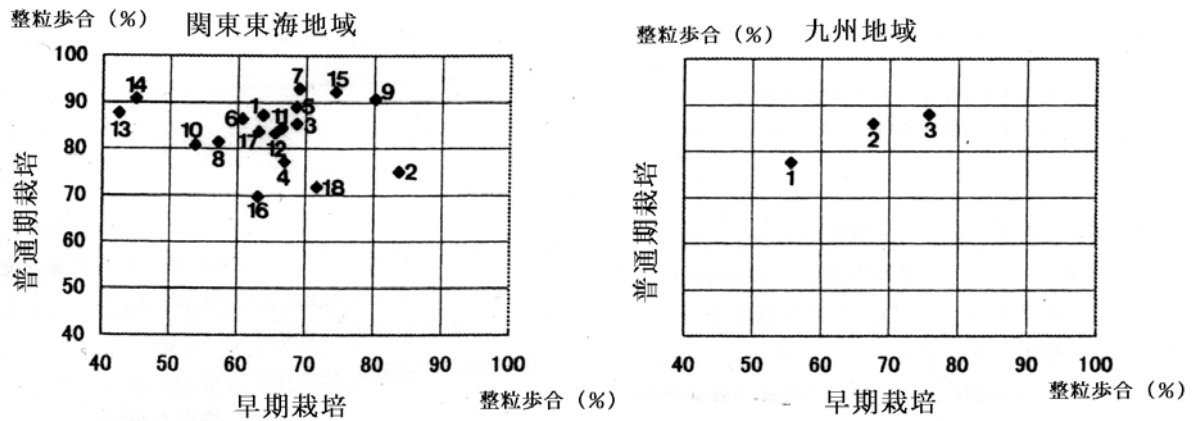
## (5) 品種間差

高温下での白未熟粒の発生には品種間差がある。「コシヒカリ」等の品種は比較的強く、「初星」, 「ササニシキ」等は最も弱いグループと考えられる。



東北地域：1:あさあけ, 2:ヤマセニシキ, 3:ひとめぼれ, 4:アキヒカリ, 5:キヨニシキ, 6:ハツニシキ, 7:レイメイ, 8:あきたこまち, 9:ササニシキ, 10:ササシグレ

北陸地域：1:タレホナミ, 2:ゆきの精, 3:越の華, 4:どんとこい, 5:フクヒカリ, 6:ハウネンワセ, 7:イナバワセ, 8:越路早生, 9:とやまにしき, 10:トドロキワセ, 11:コシヒカリ, 12:フクホナミ, 13:北陸100号, 14:キヌヒカリ, 15:おくひかり, 16:クジュウ



関東東海：1:葵の風, 2:関東79号, 3:しなのこがね, 4:大空, 5:星の光, 6:マンリョウ, 7:月の光, 8:ヤマハウシ, 9:黄金晴, 10:若葉4号, 11:日本晴, 12:あいちのかおり, 13:金南風, 14:中生新千本, 15:若葉, 16:ハツシモ, 17:農林29号, 18:松山三井

九州地域：1:ヒノヒカリ, 2:ハウヨク, 3:レイハウ

図1 育成地域別で見た水稻の玄米品質に関する登熟期高温ストレス耐性の品種間差

九州農試 (平成8年)

解説

図1は早期栽培を行うことにより高温状況下での登熟環境を設定し、登熟期の高温が玄米の品質に及ぼす影響の品種間差異を検討したものである。その結果、「コシヒカリ」等は高温下での品質低下に比較的強く、「ササニシキ」等が比較的弱い傾向が見られた。

また、ガラス温室を用いた検定(図2)でも、背白粒の発生に品種間で顕著な差異が認められた。飯田らはこの試験結果に基づき、高温耐性の基準品種として、「初星」(弱)、「ひとめぼれ」(やや弱)、「あきたこまち」(中)、「こころまち」(やや強)、「越路早生」(強)を選定している。今後は高温登熟による品質低下の品種間差を明らかにした上で、その遺伝様式を解明し、耐性育種の基盤を固めていく必要がある。

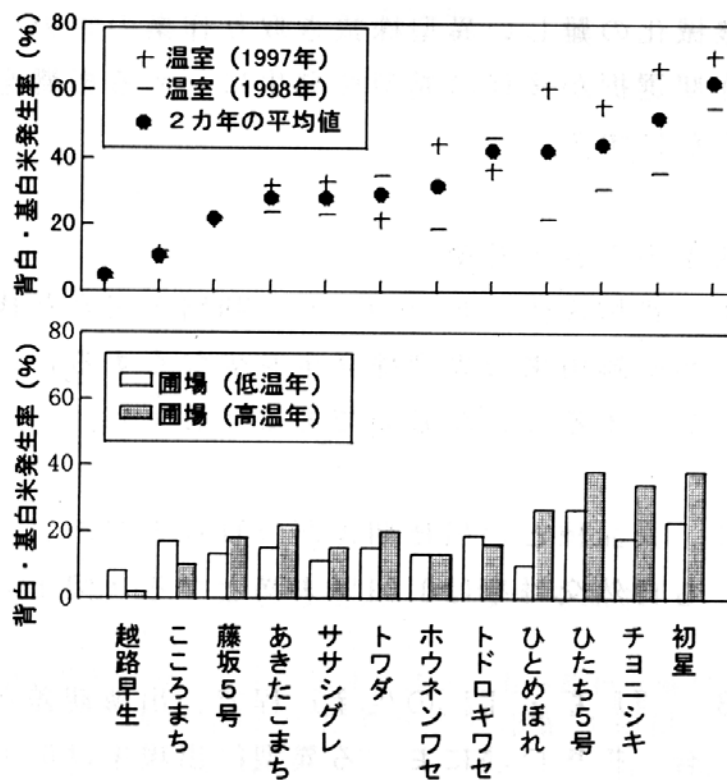


図2 背白粒・基部未熟粒発生率の品種間差(茨城生工研)

注) 圃場での登熟期間の平均気温

低温年: 24.1~24.6°C (平成10年)

高温年: 27.2~27.9°C (平成11年)

## (6) 籾数

一般に面積当たりの籾数が多いほど白未熟粒が発生しやすい。

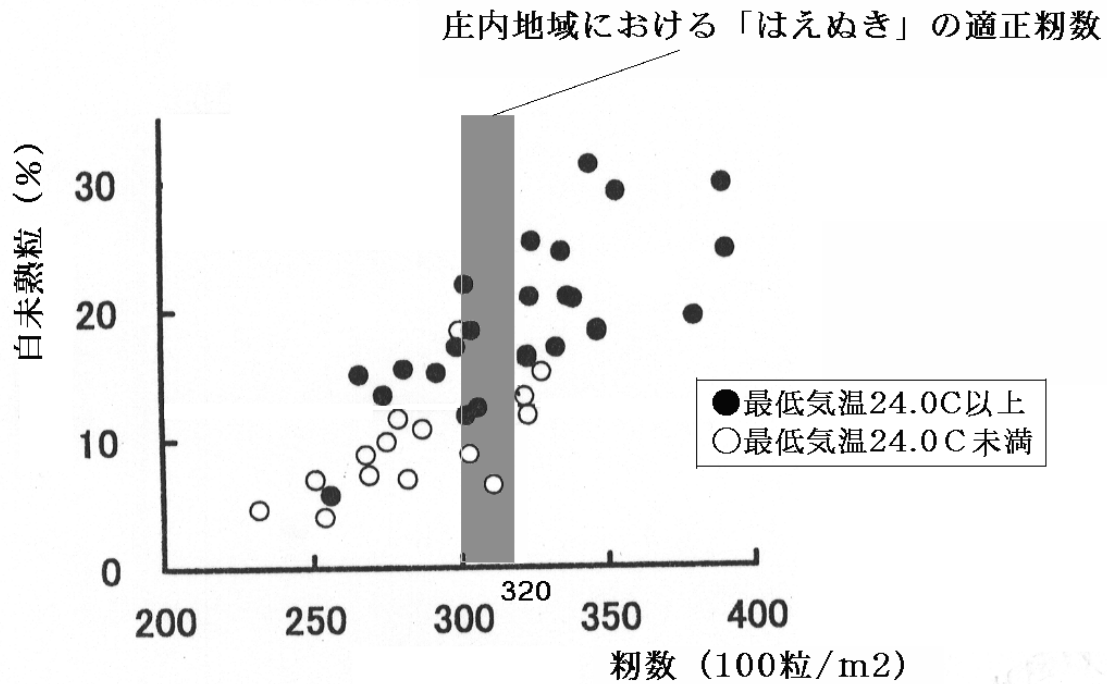


図1 出穂後20日間の日最低気温・籾数と白未熟粒歩合の関係  
(山形県農試：平成11年：はえぬき)

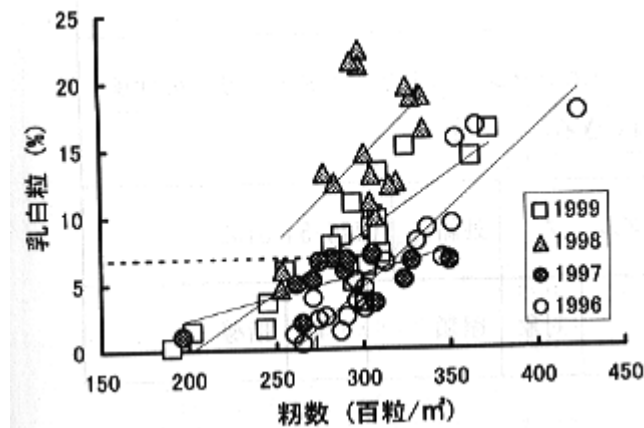


図2 総籾数と乳白粒の関係 (福井県：平成8～11年)

### 解説

図1は面積当たり籾数と白未熟粒発生比率との関係について、山形県庄内地域を対象に最低気温が24℃以下の場合とそれ以上の場合とで分けて示したものである。面積当たり籾数が多いほど白未熟粒が発生しやすくなるが、その傾向は特に高温条件下で顕著となる。しかしながら、平成11年の被害の解析では、地域や品種、発生の様相によっては面積当たり籾数と関連がみられない場合もあった。この理由についてはなお検討を要するが、籾数制御だけでは被害回避できない場合もあることに留意しなければならない。

図2は福井県における栽植密度，肥培管理を変えた4年間の試験を解析した結果である。この結果でも，乳白粒発生率と $\text{m}^2$ 当たり粒数との間に高い正の相関が見られている。

## (7) 施肥

籾数を適正な範囲に制御できる施肥量を基本とし、生育後期に分追肥を行う施肥用法が白未熟粒発生量を抑えるために有効である。ただし、生育前期が過繁茂の場合は追肥を控え目にする。

表1 乳白粒発生要因の限界値を求めるための直線回帰式(島根県平坦部:平成4~8年)

説明変数( $\chi$ )	目的変数( $y$ )	標本数	回帰式	相関係数	限界値
出穂時期LAI	乳白粒割合	97	$y=4.5965\chi-14.37$	0.656***	6.3
穂数	乳白粒割合	137	$y=0.0554\chi-13.615$	0.434***	426
出穂時SPAD値	乳白粒割合	129	$y=0.7943\chi-18.68$	0.485***	36.1
最高分げつ期LAI	出穂時LAI	13	$y=0.8785\chi+2.9349$	0.694**	2.7
最高茎数	穂数	17	$y=0.2967\chi+253.18$	0.865***	582
最高分げつ期SPAD値	出穂時SPAD値	15	$y=0.0154\chi+35.174$	0.008	-

注) 品種:コシヒカリ、移植:4月24~5月11日、\*\*は1%、\*\*\*は0.1%水準で有意  
限界値は乳白粒割合10%を与える説明変数の値

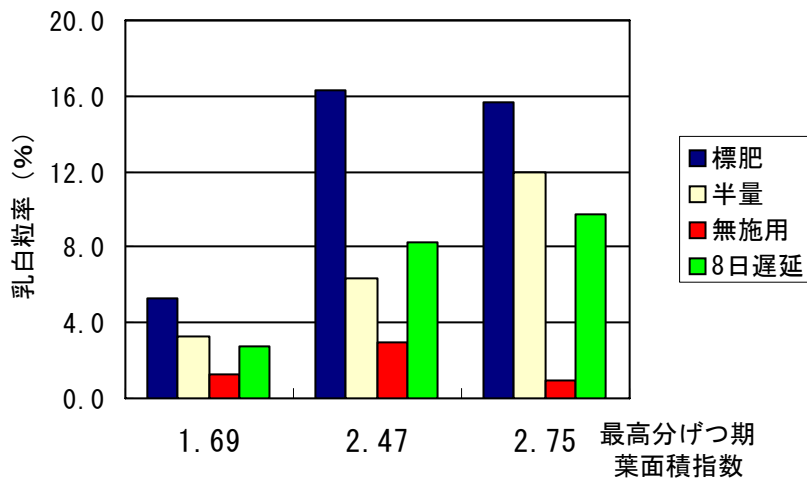


図1 生育相の異なるイネの乳白粒発生と穂肥施用法

島根県農試:平成8年:コシヒカリ  
標準穂肥は出穂18,10日前にN各0.2kg/10a施用  
同一年次の生育量の葉面積指数の差は基肥, 中間追肥の違いによる

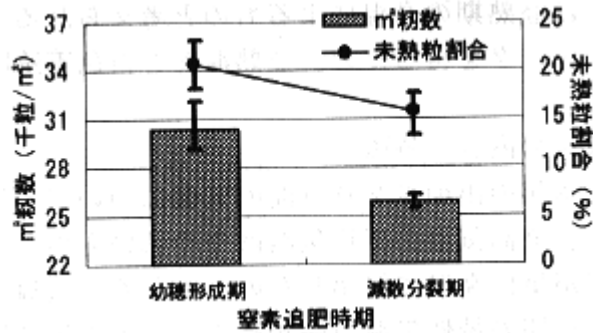


図2 窒素追肥時期と粒数および未熟粒割合の関係  
(平成10~11年, 岩手県農試)

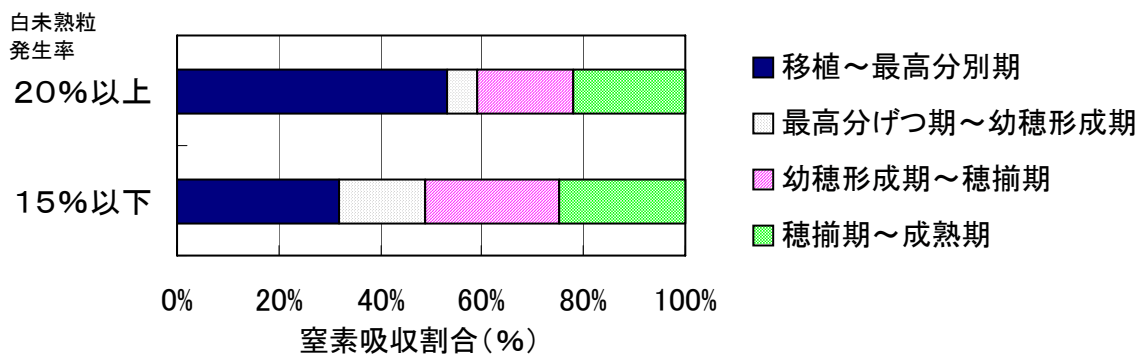


図3 白未熟粒発生率別の窒素吸収割合  
(秋田県農試1999年、品種:あきたこまち)

### 解説

追肥を行う場合は、追肥時点までの稲の生育量を第一に考え、茎数、葉色等の診断指標から窒素が不足か否かを把握し、さらに水田の肥沃度、品種や天候予測等の情報を考慮して追肥の量や時期を総合的に決める必要がある。幼穂形成期の追肥は粒数不足が予測される場合には欠かすことができないが、判断を誤り必要以上に粒数を増加させると白未熟粒の発生を助長する。島根県農試の試験では生育前期の過繁茂により、最高分けつ期の葉面積指数が2.7 (または最高茎数582本/m<sup>2</sup>) 以上となった場合の事後対策として、穂肥の減量または施用遅延が有効であった (表1, 図1)。岩手農試では同様に追肥時期を幼穂形成期と減数分裂期で比較し、減数分裂期の追肥が粒数を抑制し未熟粒割合を低下させることを明らかにした (図2)。しかし、減数分裂期の窒素追肥は障害型冷害に対する感受性を高めるので気象予測には細心の注意を払う必要がある。

白未熟粒発生比率が20%以上の圃場と15%以下の圃場で窒素の吸収パターンを比較すると (図3)、白未熟粒発生比率の多かった圃場では生育の初期に窒素が多く吸収され、後半これが低下する傾向が認められている。

しかしながら、近年の良食味米栽培技術として生育後期の窒素施用を極力抑える傾向にあるため、高温登熟年には窒素不足となり、それが高温障害を助長しているとも考えられる。また、高温年には生育ステージが前進するため、栽培ごよみにしたがった固定的な施肥設計ではなく、気象経過を考慮した生育診断に基づく肥培管理が必要である。

## (8) 倒伏

倒伏程度が大になると白未熟粒の発生比率は高まる。

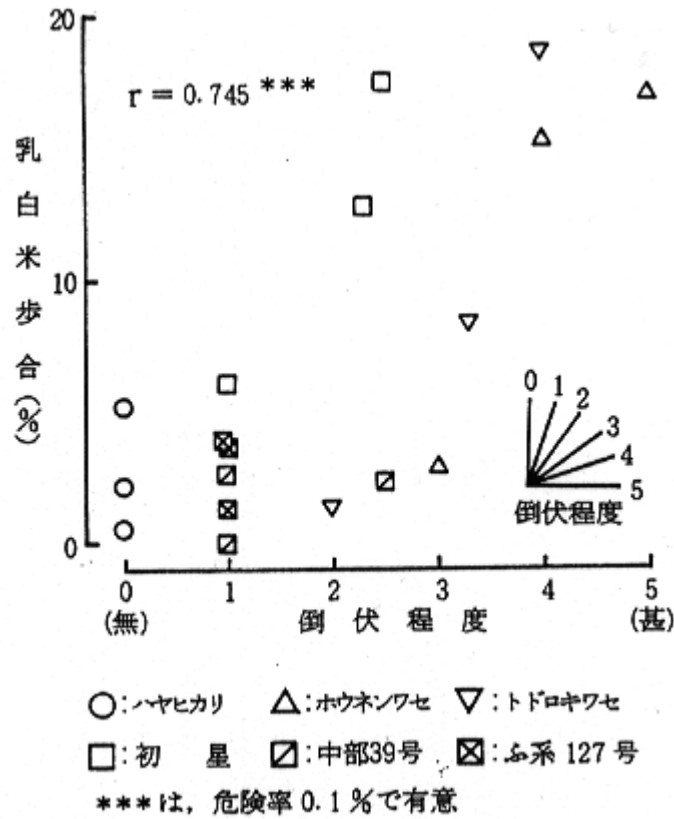


図1 成熟期の倒伏程度と乳白米歩合の関係 (千葉県農試: 昭和59年)

### 解説

図は5段階評価で示した倒伏程度と乳白粒比率との関係を示したものである。倒伏によって米粒への養分転流が阻害され白未熟粒の発生を助長すると考えられる。倒伏程度には品種間で差がみられるが、倒伏程度の増大に伴って乳白粒比率が高まる傾向が認められた。

## (9) 落水時期

登熟の早期に落水すると白未熟粒発生程度が増大する。

表1 落水時期と収量及び品質（山形農試：昭和63年：ササニシキ）

場所	落水時期 出穂後日数	玄米重		千粒重 (g)	登熟歩合 (%)	整粒歩合 (%)	白未熟 (%)	被害死 (%)	—収穫時—	
		k g/a	(%)						葉色	生葉数
庄内支場	+23	52.0	(90)	20.3	73.8	65.7	17.8	3.0	24.8	2.0
	+33	57.7	(100)	21.0	80.4	79.5	6.2	0.5	31.3	3.6
	+43	60.2	(104)	21.2	83.2	81.8	7.7	0.5	37.8	3.5
最北支場	+25	67.4	(98)	20.5	75.3	76.9	1.6	7.0	—	—
	+30	67.5	(98)	20.7	75.0	78.5	0.8	5.9	—	—
	+35	69.0	(100)	21.2	75.7	86.5	0.7	3.7	—	—

注) 収穫時の葉色は葉緑素計で止葉を測定。

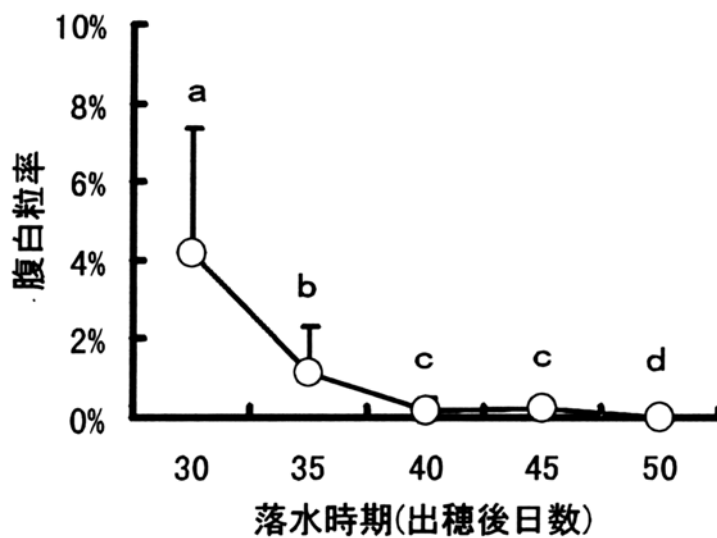


図1 落水時期（出穂後日数）と腹白粒率（岩手農試県北：平成10年：かけはし）

### 解説

落水時期が早いほど、登熟歩合は低下し、白未熟粒および死米が増加し、品質が低下する（表1，図1）。このため、出穂期以降の間断かんがいや掛け流しかんがいにより、登熟期間中の稲体の活力を維持することが重要である。

## (10) 収穫適期

登熟期が高温で推移する場合は、積算気温のみによる収穫適期の判定法だけでなく玄米品質を確認することで収穫適期を判定することが必要。

表 収穫時期と品質：山形県農試庄内支場：はえぬき

	収穫時期	出穂後 積算気温	整粒 (%)	白未熟粒 (%)	着色+薄 茶粒(%)	胴割 (%)	玄米白 度	検査 等級	食糧事務所の評価
平成 11 年 高温	9月6日	867	83.8	8.0	0.6	1.2	20.5	1中	
	9月8日	915	81.0	6.2	1.8	1.8	20.3	1中	
	9月10日	964	81.2	7.0	0.8	1.8	20.4	1下	
	9月13日	1041	84.4	5.6	0.8	0.6	20.8	1下	
	9月16日	1102	85.8	4.0	1.4	0.4	21.3	1下	
	9月20日	1190	83.0	5.2	0.8	0.4	21.2	1下	
	9月24日	1276	75.3	5.6	0.4	10.8	22.4	1下	
	9月28日	1358	66.2	6.4	0.6	17.7	22.7	2下	
9月30日	1402	65.6	4.0	0.6	21.7	22.2	2下		
平成 9 年 平常	9月22日	867	75.9		0.4		18.6		
	9月26日	915	80.6		0.6		18.6		
	9月29日	964	83.1		0.6		18.9		
	10月2日	1041	86.1		0.9		19.4		
	10月6日	1102	89.3		1.9		19.8		
	10月9日	1190	89.1		3.4		20.0		

### 解説

出穂から収穫適期までの積算気温は品種によって異なるが、中晩生種では概ね1000℃から1100℃の間とされる場合が多い。しかし、高温年の山形農試庄内支場の事例（平成11年）では出穂後積算気温900℃程度で収穫可能な玄米品質に達し、1200℃付近からは整粒歩合が低下した。

このように、高温年では積算気温のみによる収穫適期の判定法では適合度が低いので、玄米品質を確認しながら収穫適期を判定することが必要となる。