

気象および移植時期が水稲‘コシヒカリ’の 乳白粒発生に及ぼす影響

月 森 弘*

Effects of Meteorological Factors and Transplanting Time
on Milky White Rice Kernels for “Koshihikari”

Hiromu Tsukimori

I 緒 言

島根県では、1998年以降夏期の高温傾向が続き、作付面積の8割を占める‘コシヒカリ’に乳白粒が多発生している。‘コシヒカリ’の検査等級の主な格下げ要因は乳白粒で、1997年の一等米率は84%であったが、1998年には46%、1999年には57%に急激に低下した。その後、70%前後にまで回復しているものの、以前より低い一等米率が続いている（島根農政事務所、検査速報値）。県下平坦部を中心とした乳白粒による品質低下が問題となるまで、島根コシヒカリは西日本市場で高品質米として高い評価を受け流通価格も全国で上位にランクされていた。しかし、品質低下や価格の低下ばかりでなく、他産地との競争激化から販売量でも苦戦を強いられており、産地の維持、農家経営面でも深刻な問題となっている。

乳白粒は胚乳デンプンの集積が不十分なため透明化せず白くなるもので（長戸、1952）、デンプン集積不良の原因として登熟期の高温（長戸・江幡、1960；長戸・江幡、1965；森田、2000；寺島ら、2001；横山ら、2002）や日照不足（今野ら、1991；月森・丸山、2000）によると報告されている。登熟期の高温は穎果内の酵素活性

の低下（稲葉・佐藤、1976）、同化産物の転流阻害（岩澤ら、2002）を通じて同化産物集積過程に関与していると考えられている。また、栽培面での要因としては単位面積当たりの籾数の過多（寺島ら、2001；横山ら、2002；島根農試、2002）や早期落水（佐々木ら、1983）などが考えられている。

東北地方における乳白粒と登熟期の気象条件との関係については、寺島（2001）、横山ら（2002）が報告している。しかし、乳白粒を基部未熟粒、背白粒と含めて一括して白未熟粒としており、乳白粒に限定した気象条件との関連は不明確である。また、西日本地域での作付け比率の高い‘コシヒカリ’における移植時期が生育と乳白粒の発生に及ぼす影響に関して詳しい報告はされていなかった。

そこで筆者は、乳白粒が多発生している平坦部と発生が少ない山間部の過去14か年の気象条件を解析し、‘コシヒカリ’における乳白粒発生の気象的要因を解析した。また、移植時期が乳白粒の発生の発生に及ぼす影響をシンク・ソースバランスの面から検討し、乳白粒発生軽減のために必要な生育条件を明らかにしたので報告する。

II 試験方法

1. 島根県における気象要因と乳白粒発生 の関係

1989～2002年に島根県農業試験場（現農業技術センター，出雲市芦渡町，標高20m，以下出雲）および赤名分場（現中山間地域研究センター，飯石郡飯南町赤名，標高444m，以下赤名）で実施された奨励品種決定基本調査における‘コシヒカリ’の玄米品質とアメダス気象データを用い，乳白粒発生率と出穂期前後の降雨量，気温ならびに日照時間との相関を解析した。出雲では5月8日（平均）に，稚苗（育苗箱当たり乾粒換算150g播種）を栽植密度22.2株 m^{-2} ，1株3本に手植えた。窒素施肥総量は，6.7～10.1 $g\ m^{-2}$ とした。試験は2～4反復で実施した。乳白粒の発生率は検査基準により目視で行い，各区100粒について調査した。出穂期は7月26日～8月9日，成熟期は8月30日～9月22日，乳白粒率は0.9～25.0%であった。赤名においては，5月7日（平均）に移植した。窒素施肥総量は6.2～8.5 $g\ m^{-2}$ とした。その他の試験方法は出雲と同様であった。出穂期は8月1日～8月17日，成熟期は9月8日～10月6日，乳白粒率は0.0～4.0%であった。

2. 移植時期が乳白粒の発生に及ぼす影響

移植時期，窒素施肥量と乳白粒発生との関係を明らかにするため，早植え（5月上旬植え）と遅植え（5月下旬植え）の2つの作期により検討した。試験は島根県農業試験場の水田（斑鉄型グライ土，細粒質，粘質）で実施した。移植時期は，2000年は5月1日と5月25日に，2001年には5月1日と5月24日で，稚苗を

15cm×30cmに手植えた。窒素施肥量は両年とも基肥として0，1.5，3.0 $g\ m^{-2}$ の3水準，穂肥として0，2.0，3.0 $g\ m^{-2}$ の3水準とした。穂肥は2000年には出穂20日前，2001年には出穂18日前に緩効性肥料（セラコートCK-606，成分含有率16-0-16）で1回施用した。試験は両年とも2区制で行った。収量および収量構成要素は，成熟期に60株を刈り取り調査した。籾数は全籾を回収し十分攪拌した後，均等に採取した200gの籾数を調査し，単位面積当たりへ換算した。精玄米は粒厚1.85mm以上の粒厚のある玄米とし，水分15%に換算した。無窒素区，標肥区（基肥窒素量1.5 $g\ m^{-2}$ ，穂肥窒素量2 $g\ m^{-2}$ ），多肥区（基肥窒素量3 $g\ m^{-2}$ ，穂肥窒素量3 $g\ m^{-2}$ ）については幼穂形成期，穂揃期，成熟期に各反復から10株ずつ地上部を採取し，70℃で48時間以上通風乾燥し乾物重を測定した。乳白粒は精玄米100g相当粒数約4,500粒について検査基準に準じて目視で調査した。

III 結果および考察

1. 島根県における気象要因と乳白粒発生 の関係

表1に出穂後の気象条件と乳白粒の発生との相関を示した。出穂後の日平均気温および日最低気温は特に高い正の相関関係が認められ，特に出穂後20日間の平均最低気温とは極めて高い正の相関関係が認められた。降水量との有意な相関関係は認められなかったが，日照時間については出穂後10日間のみ，1%水準で有意な相関関係が認められた。日照時間との関係では，登熟期前期の寡照条件で乳白粒が多くなること

表1 出穂後の気象条件と乳白粒発生率の相関係数

気象要素	出穂後日数(日)					
	1～10	11～20	21～30	1～20	11～30	1～30
日最高気温	0.48278**	0.5516**	0.3230	0.5634**	0.4730*	0.5127**
日平均気温	0.6244***	0.6636***	0.4307*	0.6795***	0.5844**	0.6287***
日最低気温	0.6118***	0.7149***	0.4526*	0.7241***	0.6420***	0.6789***
日日照時間	0.5044**	-0.0672	0.1509	0.2943	0.0536	0.2831
日降水量	-0.3723	0.3324	-0.2078	-0.0149	0.0885	-0.1325

注)*は5%水準，**は1%水準で有意，***は0.1%水準で有意な相関関係があることを示す。

n=28

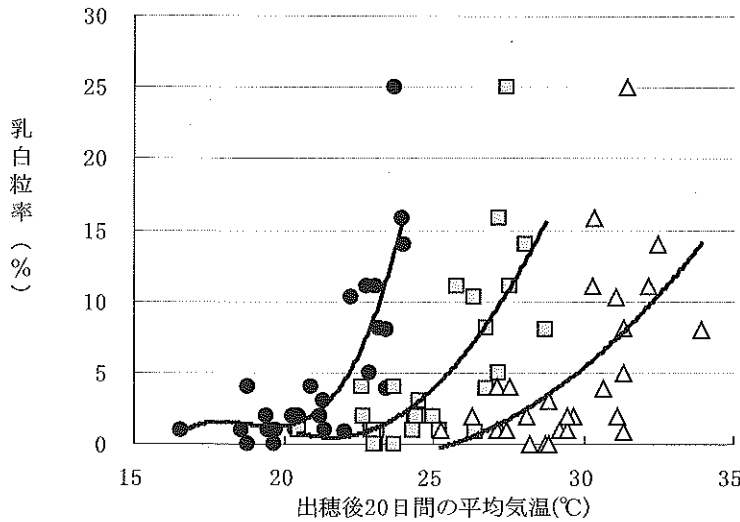


図1 出穂後20日間の気温と乳白粒発生の関係

● 最低気温 $y = 0.1088x^3 - 6.1205x^2 + 114.47x - 710.68$
 $R^2 = 0.6903$

□ 平均気温 $y = 0.295x^2 - 12.737x + 137.94$
 $R^2 = 0.5104$

△ 最高気温 $y = 0.1207x^2 - 5.4898x + 61.468$
 $R^2 = 0.3275$

が報告されており（長戸，1952；今野ら，1991；月森・丸山，2000；寺島ら，2001），負の相関関係にあるのが普通である。しかし，本調査では登熟期に日照が多かった年は気温が高かったことから，気温の影響がより強く現れたものと推察された。なお，乳白粒の発生率と出穂前10，20および30日間の気象要素との関係は出穂後の相関より低かった（データ省略）。

気温と乳白粒の発生との関係を図1に示した。一等米の要件を満たす乳白粒の発生率の上限は6%が目安になると考えられている（島根農試，2002）。そこで，乳白粒率6%となる気温を近似曲線の回帰式から求めると，出穂後20日間の平均最高気温は30.3℃，平均気温は25.9℃，最低気温は22.5℃となり，これ以上の気温となる気象条件では乳白粒の発生が急激に高まる（月森，2003；2005）。本実験から導き出された上限気温は，東北地域における乳白粒を含む白未熟粒発生による品質低下の限界気温を出穂後20日間の平均最高気温31～32℃，平均気温27～28℃，最低気温23～24℃とした報告（寺島，2001）や乳心白粒が出穂後20日間の平均最低気温24℃以上で多発するとした横山ら（2002）よりやや低い温度となった。これは，これらの報告では

乳白粒ばかりでなく，基部未熟粒や背白粒も含めた解析をしており，さらに一定の発生率以上になった気温でなく，急増した気温を報告しているため，本報告と必ずしも一致しなかったと考えられる。

標高が444 mの赤名においては，限界気温となる出穂後20日間平均最低気温22.5℃を超えることは稀であるが，平坦地域の出雲では5月上旬に‘コシヒカリ’を移植すると，出穂後の気温が限界気温を超える年が近年多くなっている。出穂後の気温が高くなりやすい平坦部で乳白粒の発生を抑制するには，出穂後の気温を下げる事が重要である。そのためには，移植時期を遅らせて，出穂後の気温が低下する時期に出穂させることが対策の一つと考えられる。‘コシヒカリ’の出穂後20日間平均最低気温が22.5℃以下となるのは，本県では概ね8月第2半句以降で，そのためには5月下旬に移植する必要がある（データ省略）。

2. 移植時期が乳白粒の発生に及ぼす影響

各試験年における移植時期と出穂後20日間平均最低気温は，2000年の早植え（5月1日植え）で22.1℃，遅植え（5月25日植え）で22.0℃と両移植時期の気温はほぼ同じであった。一方，

2001年の早植え(5月1日植え)で23.8℃, 遅植え(5月24日植え)で22.9℃で, 早植えの登熟期間が高温条件となり, 遅植えとの温度差が大きかった。

図2に移植時期および窒素施用量と乳白粒率の関係を示した。2000年, 2001年とも遅植えが早植えより乳白粒率が低くなる傾向があった。また, 基肥窒素量との関係は明らかでなかったが, 両作期とも穂肥窒素量が多くなるほど乳白粒の発生率が高くなる傾向が認められた。早植えでは,

穂肥窒素量 2 g m^{-2} では無施用に比べ乳白粒が大きく増加したが, 遅植えではわずかな増加にとどまった。穂肥窒素量が 3 g m^{-2} と多肥条件では, 遅植えの方がかえって乳白粒の発生が多くなる場合があった。これは, 遅植えで倒伏程度が大きくなったことが影響していると推察された。

図3に施肥窒素総量と単位面積当たり粒数の関係を示した。遅植えは早植えよりどの施肥水準でも粒数が高くなる傾向があった。

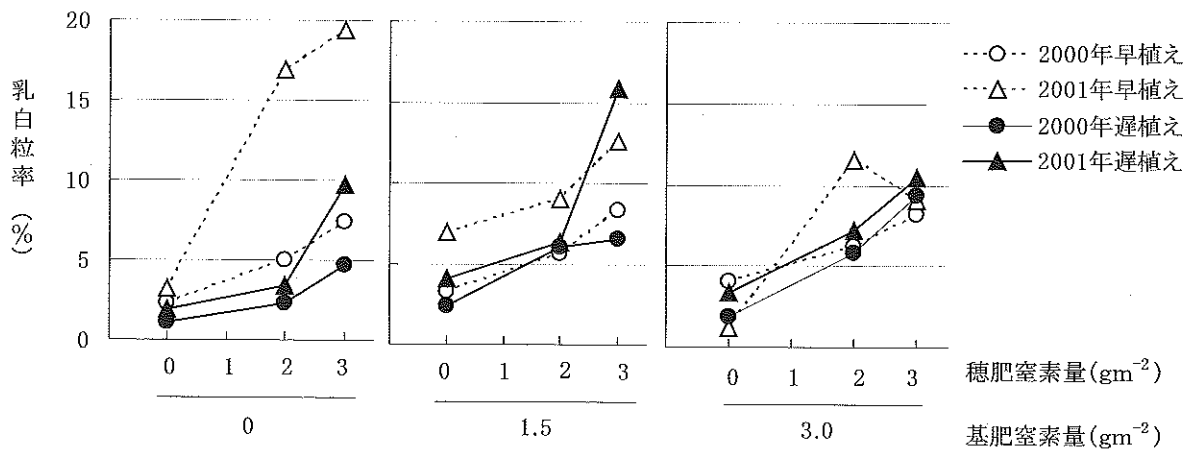


図2 移植時期および窒素施肥量が乳白粒の発生に及ぼす影響

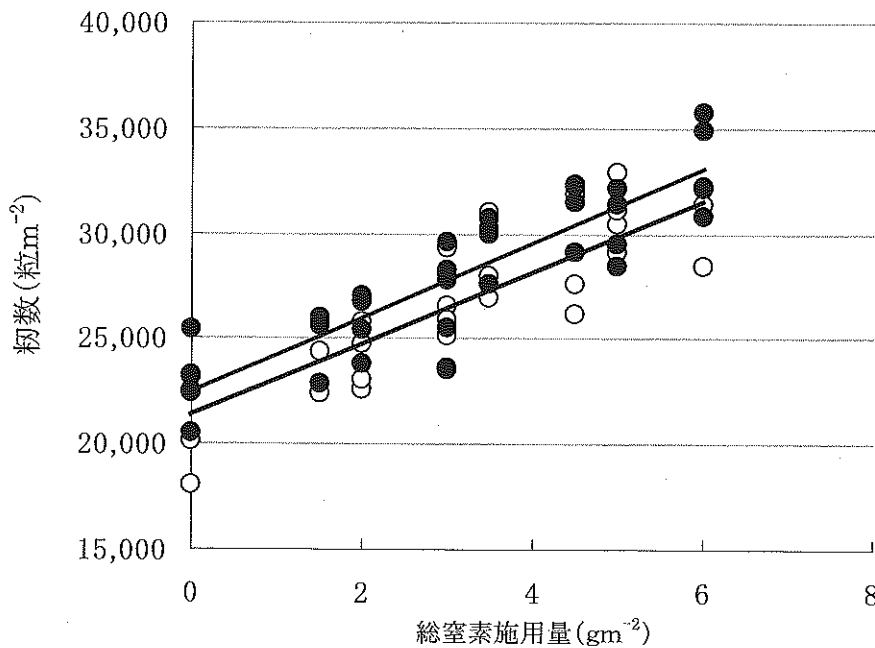


図3 総窒素施用量と単位当たり粒数の関係

○ 早植え 回帰曲線 $y = 1703.8x + 21306$ $R^2 = 0.7198$

● 遅植え 回帰曲線 $y = 1774.2x + 22463$ $R^2 = 0.7708$

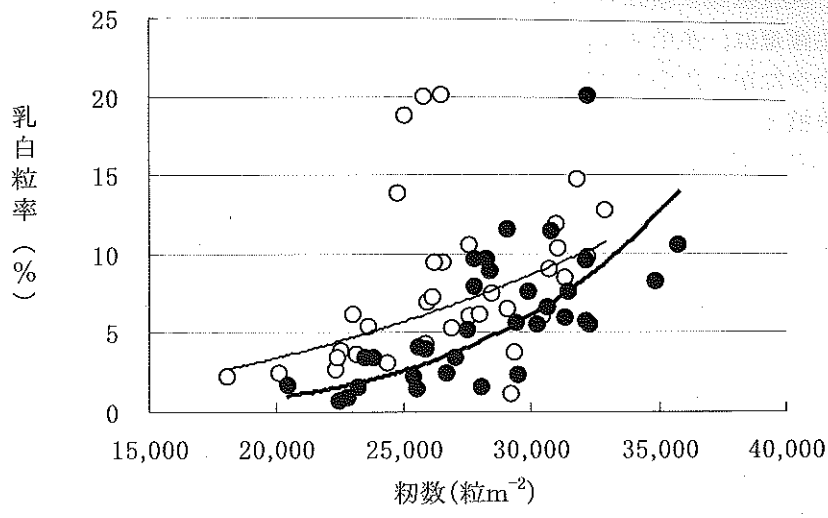


図4 単位面積当たり粒数と乳白粒率の関係
 ○早植え 回帰曲線 $y=5.251 \times 10^{-10} x^{2.282}$ $R^2=0.226$
 ●遅植え 回帰曲線 $y=7.565 \times 10^{-21} x^{4.670}$ $R^2=0.576$

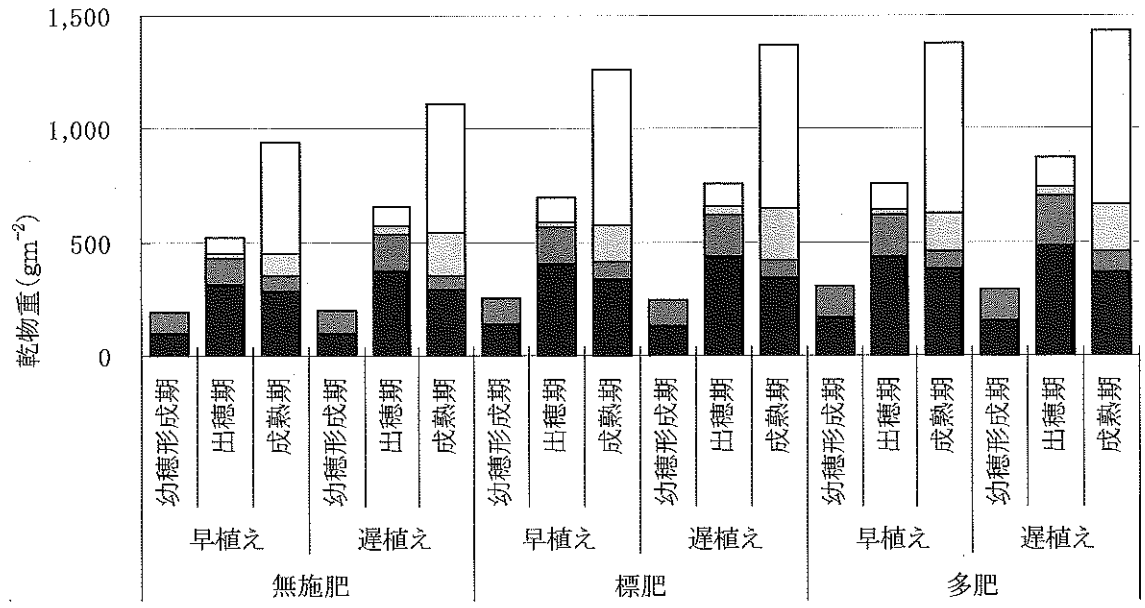


図5 移植時期および窒素施肥量が乾物生産量に及ぼす影響
 標肥区は基肥窒素 1.5gm^{-2} ,穂肥窒素 2gm^{-2} ,多肥区は基肥窒素 3gm^{-2} ,穂肥窒素 3gm^{-2} 施用した。
 ■稈・葉鞘 ■葉身 □枯死部 □穂

図4に単位面積当たり粒数と乳白粒の発生の関係を示した。乳白粒の発生は単位面積当たり粒数と正の相関を示した。単位面積当たり粒数と乳白粒率の関係を作期で比較すると、遅植えは早植えに比べ全体に粒数が同等以上であったにもかかわらず、乳白粒率が低かった。乳白粒

率6%となる粒数は、早植えでは概ね25,000粒であったが、遅植えでは30,000粒と多かった。図5に移植時期と窒素施肥量が乾物生産に及ぼす影響を示した。いずれの施肥水準でも出穂期における乾物重が遅植えで重くなった。特に、稈・葉鞘重および葉身重が早植えより重くなる

傾向がみられた。同化産物供給源の一つである登熟期間の乾物生産量は、多肥条件では遅植えが早植えよりやや少なかったが、無施肥および標肥条件では、遅植えが多かった。また、成熟期には遅植えの枯死部重が多い傾向にあった。この原因として、早植えに比べ遅植えでは、葉色が登熟期中頃から後半にかけては急速に低下したためと考えられる(データ省略)。

移植時期および窒素施肥量とシンク・ソースバランスとの関係を見るため、単位面積当たり籾数/わら重の比率(以下籾数・わら重比)を図6に示した。ソースとして出穂期の葉身重を用いる方がシンク・ソースバランスを検討するには、より適切と考えられるが、本実験では、出穂期葉身乾物重は標準的な施肥データのみで、出穂

期葉身乾物重と成熟期わら重の間に0.987の高い相関係数が得られたので(データ省略)、わら重をソース量として置き換えた。兩年とも、いずれの施肥水準でも籾数・わら重比は遅植えが早植えより小さかった。

遅植えは早植えにおける単位面積当たり籾数を同一にして比較すると、遅植えでは乳白粒が少なかった。また、早植えと遅植えで出穂後20日間の平均最低気温差が無かった2000年でも遅植えで乳白粒の発生が少なかった。これらのことから、遅植えで乳白粒が少ない要因は、気象要因の他に遅植えでは籾数・わら重比が小さく、籾当たりの養分供給部位が多かったためと推察される。

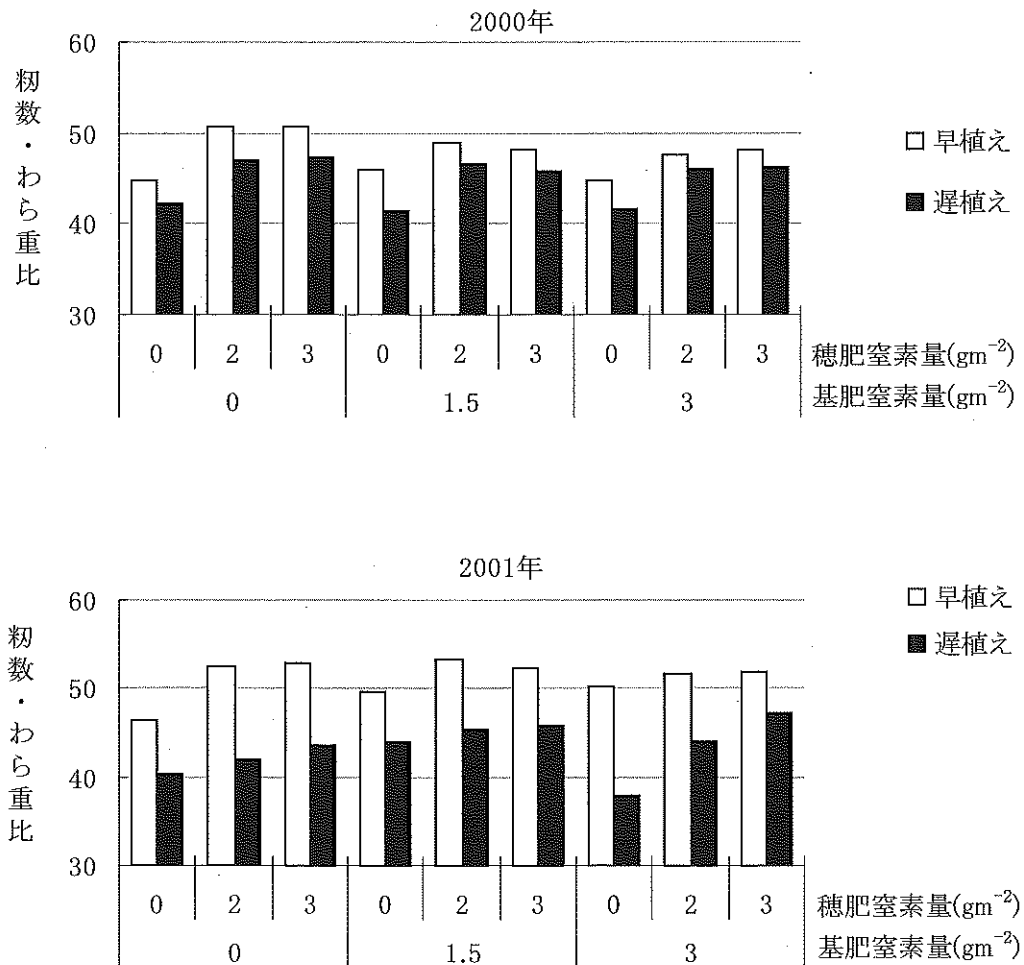


図6 移植時期および窒素施肥量が籾数・わら重比に及ぼす影響

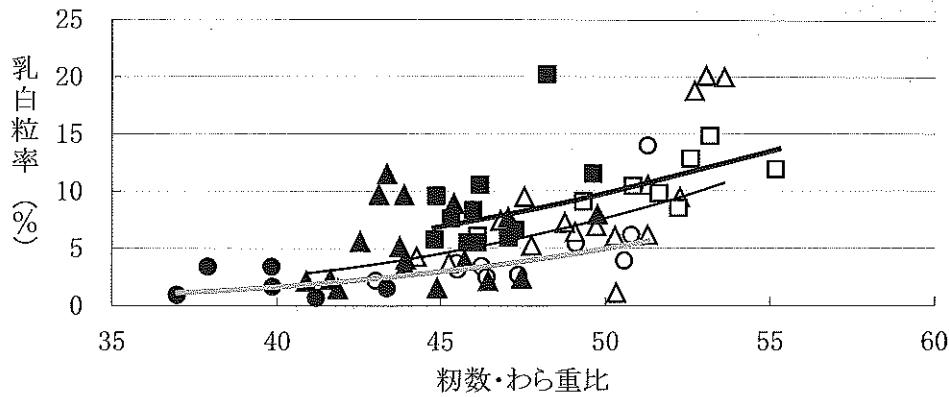


図7 粒数・わら重比と乳白粒率の関係

- : 早植え25,000粒 m^{-2} 未満
 - : 遅植え25,000粒 m^{-2} 未満
 - △: 早植え25,000~30,000粒 m^{-2} 未満
 - ▲: 遅植え25,000~30,000粒 m^{-2} 未満
 - : 早植え30,000粒 m^{-2} 以上
 - : 遅植え30,000粒 m^{-2} 以上
- 粒数30,000粒 m^{-2} 以上の回帰曲線 $y=2.281 \times 10^{-5}x^{3.316}$ $R^2=0.3511$
 ——— 粒数25,000~30,000粒 m^{-2} の回帰曲線 $y=3.835 \times 10^{-8}x^{4.884}$ $R^2=0.2603$
 - - - 粒数25,000粒 m^{-2} 未満の回帰曲線 $y=2.383 \times 10^{-8}x^{4.897}$ $R^2=0.4876$

単位面積当たり粒数を25,000粒未満、25,000~30,000粒未満、30,000粒以上の3つのランクに分けて、粒数・わら重比と乳白粒発生の関係を図7に示した。単位面積当たり粒数が25,000粒未満と少ない場合は、粒数・わら重比は全体に小さく、乳白粒の増加も緩やかであった。粒数が多くなると、粒数・わら重比は全体的に大きくなるとともに、乳白粒の増加も大きく、同じ粒数・わら重比でも乳白粒の発生は多くなった。折谷(1990)は下位葉では窒素含有量、光合成活性がともに低くなるが呼吸量はかえって高くなるとしている。したがって、粒数が多くなると粒数・わら重比が同じでも、葉身重が重くなり、倒伏による受光体勢の悪化、下位葉の同化能力の低下や呼吸量の増加が、葉身重当たりのソース能を低下させているものと推察される。

また、早植えでは遅植えに比べ全体的に粒数・わら重比が高く、乳白粒が多く発生していた。したがって、施肥法、栽植密度等の栽培方法の改善により、粒数を増加させず出穂期の葉身を増加させられれば、乳白粒の発生を軽減できると考えられた。小葉田ら(2004)は穂揃期に間引き処理を行い、同化能力を高めると高温条件でも乳白粒の発生が低下したことから、乳白粒は高温で高まった子実乾物増加速度に対して

同化産物供給が不足することにより発生するとし、ソース能の強化が乳白粒軽減対策になることを示唆している。

以上より、移植時期を遅らせると登熟期の気温を低下させることができる他に、シンクとソースのバランスを向上させ乳白粒を軽減することが可能と考えられる。本報では単位面積当たり粒数をシンク、同じくわら重をソースとして解析したが、シンクに粒の容量を考慮しておらずシンクサイズを評価するには不十分であった。また、ソースとして登熟や収量向上に重要な役割を果たすとされている出穂前貯蔵炭水化物(翁ら, 1982)や同化産物の粒への配分が移植時期によりどのように違うかについては未解明であることから、シンク・ソースバランスについては今後さらに検討が必要である。

移植時期別の良質米生産技術について検討すると、早植えでは、登熟期の気温が高いことやシンク・ソースバランスが遅植えより悪いと考えられた。図4で示したように乳白粒を6%以下に抑制するには、単位面積当たり粒数が25,000粒程度になるように施肥管理をする必要があると判断される。

単位面積当たり粒数と精玄米重の関係を図8に示した。単位面積当たり粒数と精玄米重は高い正の相関関係にあり、単位面積当たり粒数25,000

粒の時の精玄米重は、回帰式から求めると535 g m⁻²であった。一方、遅植えでは、登熟気温の降下やシンク・ソースバランスの向上から籾数が30,000粒までは乳白粒の発生が回避できると考えられる。しかし、図9のとおり稈長と倒伏の関係を見ると、遅植えは早植えに比べ稈長が伸びやすく最大100cm近くに達し、倒伏程度3以上が多くなった。そこで、遅植えにおける稈長と倒伏程度との関係を求めたところ、回帰式は $y=0.2404x-18.9$ で0.1%水準で有意であった(データ省略)。県の水稻栽培指針(島根県農林水産部)では倒伏程度3以上が予想される場合は倒伏軽減対策をとるよう指導しており、

栽培上の倒伏限界を2.5(傾き角度45°程度)とすると、回帰式より稈長を89cm以下とする必要があった。

さらに、図10のとおり遅植えにおける稈長とm²当たり籾数との関係から、稈長89cmの時回帰式より限界籾数を求めると27,600粒となった。その時の精玄米重は、図8の回帰式より550 g m⁻²であった。

以上より、乳白粒の発生率を6%以下に抑制するには、早遅植えでは乳白粒の発生が制限要因となつて、単位面積当たり籾数は25,000粒程度が上限であることが明らかとなった。一方、遅植えでは倒伏の発生が制限要因となり、稈長

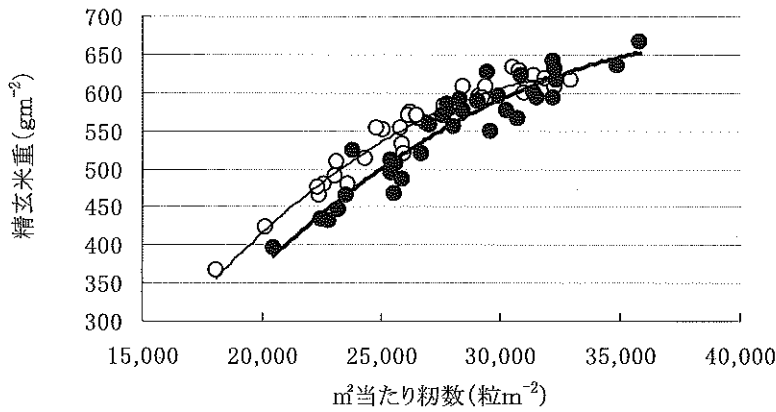


図8 単位面積当たり籾数と精玄米重の関係

○ 早植え 回帰曲線 $y=-9.660 \times 10^{-7}x^2+0.0673x-543.961$ $R^2=0.955$

● 遅植え 回帰曲線 $y=-7.254 \times 10^{-7}x^2+0.0582x-501.847$ $R^2=0.891$

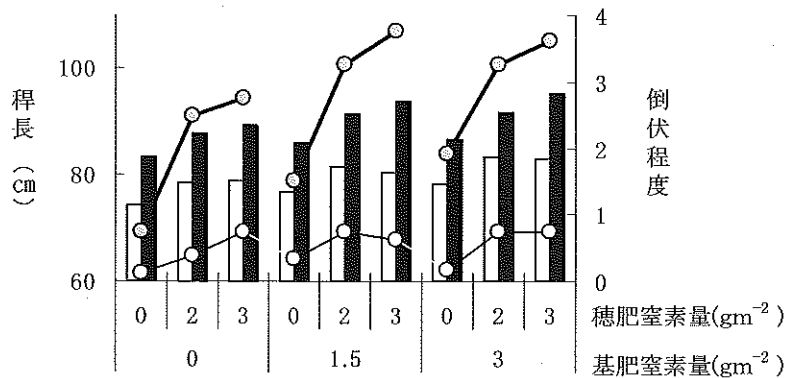


図9 窒素施肥量が稈長および倒伏程度に及ぼす影響

□ 早植え稈長 ■ 遅植え稈長
 ○ 早植え倒伏程度 ● 遅植え倒伏程度

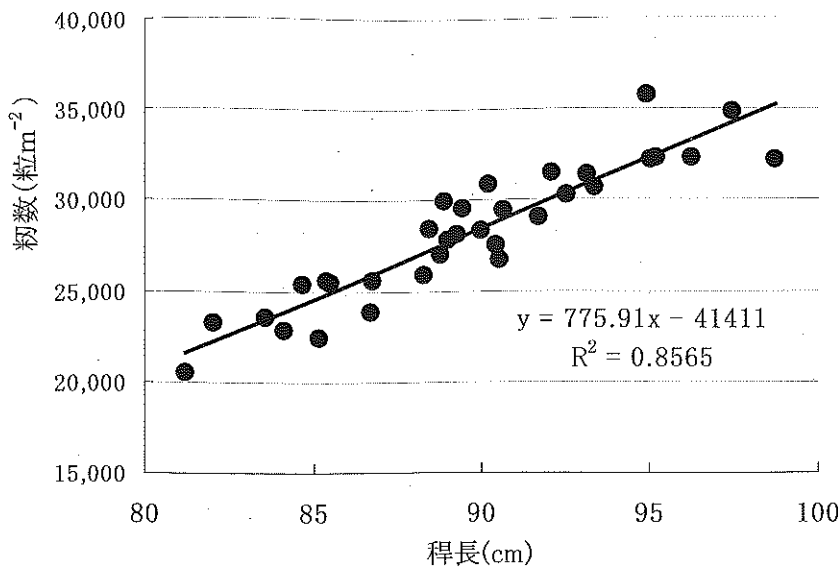


図 10 遅植えにおける稈長と単位面積当たり粒数の関係

89cm および単位面積当たり粒数 28,000 粒程度が粒数の上限と考えられた。したがって、良質米生産としては、これら粒数の上限を越えないように穂肥窒素量を決定する必要がある。

IV 摘要

島根県における水稻‘コシヒカリ’の乳白粒発生に及ぼす気象および移植時期の影響を検討した。

1. 乳白粒は、出穂後 20 日間の気温と高い有意な正の相関を示した。特に平均最低気温との相関が高く、乳白粒率 6% となる限界気温は 22.5℃であった。
2. 遅植えでは、早植えに比べ登熟期の気温が低下すること、粒数に対するわら重の比率が高まることにより、乳白粒の発生が減少すると考えられた。
3. 乳白粒を 6% 以下とする単位面積当たり粒数の上限は、早植えでは 25,000 粒であったが、遅植えでは 28,000 粒であった。良質米の生産のためには、粒数の上限を越えないように穂肥の窒素施用量を決定する必要がある。

引用文献

稲葉健五・佐藤庚 1976. 水稻の高温稔実障害に関する研究. 第 6 報登熟期の高温が穎果の酵

素活性に及ぼす影響. 日作紀 45:162-167.
 岩澤紀生・松田智明・荻原義邦・新田洋司 2003. 水稻登熟期の高温ストレスに伴う粒厚減少の構造的要因. II. 高温ストレスによる胚乳組織形成の異常. 日作紀(別 1)72:92-93.
 小葉田亨・植向直哉・稲村達也・加賀田恒 2004. 子実への同化産物供給不足による高温下の乳白粒発生. 日作紀 73:315-322.
 今野周・今田孝弘・中山芳明・宮野斉・三浦浩・高取寛・早坂剛 1991. 登熟期の環境要因及び生育条件が水稻登熟, 収量及び品質に及ぼす影響. 山形農試研報 25:7-22.
 森田敏 2000. 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—. 日作紀 69:391-399.
 長戸一雄 1952. 心白・乳白米及び腹白の発生に関する研究. 日作紀 21:26-27.
 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 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.
 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.
 折谷隆志 1990. 老化のメカニズム. 松尾孝嶺監

- 修, 稲学大成. 生理編 農山漁村文化協会, 東京. 109-120.
- 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. 新潟農試研報 33:45-54.
- 島根県農業試験場 2002. 高温登熟条件下における乳白粒を抑制する「コシヒカリ」の適正籾数. 平成13年度近畿中国四国農業研究成果情報. 近畿中国四国農業試験研究推進会議・近畿中国四国農業研究センター. 89-90.
- 寺島一男 2001. 東北地域における夏季の異常高温が水稻生育および米品質に及ぼす影響の解析と今後の対策. 農林水産省東北農業試験場. 67-78.
- 寺島一男・齋藤祐幸・酒井長雄・渡部富男・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.
- 月森弘・丸山幸夫 2000. 水稻品種コシヒカリの乳白粒発生に及ぼす気象条件の影響—幼穂発育期の日照条件による乳白粒発生率の変動—. 日作紀(別2)69:10-11.
- 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. 日作紀別(2)72:434-439.
- 月森弘 2005. 温暖化する気象条件下での早期栽培イネにおける品質・収量低下に対する技術的対応. 日作紀 74:80-82.
- 横山克至・高取寛・藤井弘志・渡部幸一郎・安藤正・小南力・松田裕之・柴田康志・長谷川愿 2002. 庄内地域における登熟期の高温条件が米粒品質に及ぼす影響. 山形農試研報 36:51-66.

Summary

The effects of meteorological factors and transplanting time on milky white rice kernels for "Koshihikari" were investigated.

1. A high positive correlation was observed between milky white rice kernels and high temperature during 20 days after heading. For keeping milky white rice kernels below 6 %, the minimum temperature needs to keep less than 22.5°C.
2. It was suggested that milky white rice kernels of late planting was decreased when the temperature during grain filling period fell and the rate of grains number per straw weight was decreased.
3. The maximum number of grains per square meter for keeping milky white rice kernels less than 6% at early planting and late planting was 25,000 and 28,000, respectively.
4. In conclusion, it's necessary to determine the quantity of nitrogen topdressing at panicle formation stage not to exceed the maximum number of grains per square meter for the production of good quality rice.