

作物生理・細胞工学

子実への同化産物供給不足による高温下の乳白米発生

小葉田 亨^{*,1)}・植向直哉²⁾・稲村達也³⁾・加賀田 恒³⁾

(¹⁾ 島根大学・²⁾ 株式会社サタケ・³⁾ 京都大学大学院)

要旨: 近年、西日本を中心に乳白米多発による品質低下が起きている。乳白米発生原因としては、登熟期高温による子実成長過程への直接的影響、あるいは着生穎花数が多い、あるいは葉色の落ちたイネで乳白米発生が著しくなるなどから子実への同化産物供給不足が考えられる。そこで、本研究では3年間にわたり島根県と大阪府の気温・立地条件の異なる3地域でコシヒカリを栽培し、圃場条件下での乳白米発生状況と登熟期間引きにより物質生産を増やしたときの乳白米発生を調べ、同化産物供給不足が乳白米発生の主要原因であることを明らかにしようとした。一部地域では登熟期にフィルムで覆った高温区を設けた。その結果、穂揃い後30日間の平均気温 (T_{30}) は23~29℃となり、籾の充填率は70~90%、乳白米発生率は0.8~16.0%の変異を示した。 T_{30} が高いほど乳白米率が大きくなる傾向がみられた。そこで穂揃期以降、栽植密度を半分に間引いたところ、どの地域、温度処理でも間引きにより籾の充填率はほぼ90%近くまで増加し、ほとんどの地域で乳白米率が6%以下に減少した。全結果を込みにすると、充填率が増えると乳白米発生率が低下した。したがって、間引きは幅広い温度域で籾の充填率と乳白米発生率を改善した。以上から、乳白米は子実の同化産物蓄積過程自体が高温で阻害されるよりも、高温によって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主に生ずると推定された。そのため、登熟期の同化促進技術は乳白米発生の抑制に有効であると考えられた。

キーワード: コシヒカリ, 高温, 子実乾物増加速度, 充填率, 同化産物, 乳白米。

1999年の我が国の全国イネ作況指数は平年並みであったにもかかわらず、各地で一等米比率が大きく低下した(寺島ら2001)。島根県においては、すでに1997年の一等米比率78%が、1998年には53%、1999年には55%と急激に低下した(島根県資料2003)。その後、島根県農業試験場によって晩植え等の対策が取られた結果、同県での一等米比率は63から70%に回復したものの、以前に比べて低い値が続いている。一等米比率の低下は、米の買い上げ価格の下落、産地の評価低下等を通して産米農家に深刻な影響を与えている。このような一等米比率の低下は主に乳白米の多発に基づく(寺島ら2001, 島根県資料2003)。乳白米は胚乳デンプンの充実が不十分な結果、乾燥後空気が入って乳白色に光が乱反射することにもとづく(長戸1952, Tashiro and Wardlaw 1991, 松村2001)。

従来から乳白米は登熟期の高温によって発生すると考えられてきた(長戸1952, 長戸・江幡1960, 森田2000)。その根拠としては、乳白米多発の1999年は各地で最高及び平均気温が平年を上回ったこと(寺島ら2001)、実験的に高温をイネに与えると乳白米の発生が増加したこと(長戸・江幡1960, 長戸・江幡, 1965, 森田2001)による。圃場データに基づく、登熟期あるいは登熟期を含む7~8月の平均気温が25~27℃を超えると(西尾・橋本1997, 有坂2001, 寺島2001, 古土井2002)、また、日最低気温(島根農試2002, 横山2002)が22℃を超えると、乳白米発生率が急激に増加し、一等米比率が低下した。ただし、これらのデータでは乳白米発生率の温度反応には大きなばらつきが認められる。

また、従来の現地データを総合すると、乳白米の発生は、同じ温度でも、着生穎花数が多いほど、成育中後期に葉色が落ちたイネほど、早期落水や根腐れした場合ほど多くなることが知られている(津森1987, 寺島ら2001)。また、高温の年ほど籾数増加にともなう乳白米発生率の増加が著しいことが観察されている(島根農試2002)。すなわち、気温が上昇すると乳白米の発生が高くなる傾向があるとしても、籾数で示される受け入れ側の大きさに対して、茎葉からの同化産物供給が低下すると予測されるようなイネの成育状況や管理方法が発生率を高めていると見なされる。同化産物供給要因が、気温と乳白米発生率との関係に強く介在していることは、長戸(1952)や長戸・江幡(1965)もポット実験の遮光、剪葉や枝梗間引き処理で示唆している。

その一方で、乳白米のデンプン集積不良の原因には、子実のデンプン合成酵素の低下が関与していることが示唆された(寺島2001, 松村2001)。高温はイネ子実の酵素活性に強く影響するからである(稲葉・佐藤1976)。また、高温による胚乳内部位による呼吸活性の違い(安庭ら1993)や胚乳内の同化産物の転流・移行の阻害(岩澤ら2002)がデンプン集積に影響することによって、乳白米が生ずるという推定もなされている。すなわち、乳白米の発生には子実への同化産物供給の不足と、子実の同化産物集積過程への高温の影響の両方が関与していると考えられている。しかし、実際の圃場における乳白米発生においてどちらが主要原因となっているかを、定量的に明らかにしようとした結

果は見当たらない。乳白米の発生を防止するためには、圃場条件において何が発生の主要原因であるのかを明らかにし、その発生機作に基づいて技術的対策を立てる必要がある。

そこで、本研究では数年に渡り立地・温度環境が異なる圃場においてコシヒカリを栽培し、一部では人為的に高温処理を与え、登熟期の間引きによって子実への同化産物供給を増やしたときに乳白米発生が減少するかどうかを調べ、乳白米発生における同化産物供給の影響の程度を明らかにすることを目的とした。さらに、この結果に基づき栽培技術的対応によって乳白米発生の防止が可能かどうかを考察した。

材料と方法

1999年に島根県松江市の島根大学附属農場水田（標高17 m，東経133度04分，北緯35度37分）と島根県農業試験場赤名分場（現島根県中山間地域研究センター）（標高444 m，東経132度24分，北緯35度00分），2000年には同松江，2001年には大阪府高槻市京都大学農学部附属農場（標高10 m，東経135度38分，北緯34度05分）において実験を行った。コシヒカリを供試した。松江と高槻は低地で高温，赤名は高冷地の低温地として設定した。松江では育苗用土を詰めた箱に播種した中苗を，1999年5月22日と2000年5月10日に，一株2本植え，15×30 cmで移植した。赤名では1999年4月30日に松江と同様に移植した。高槻では2001年6月9日に中苗を18×33 cmに移植した。施肥は，松江では，基肥として， $g\ N\ m^{-2}$ ， $((NH_4)_2SO_4)$ として， $8\ g\ P\ m^{-2}$ ($CaHPO_4$ として)， $4\ g\ K\ m^{-2}$ (KCl として) が，追肥として，出穂3週間前に $4\ g\ N\ m^{-2}$ と $4\ g\ K\ m^{-2}$ を与えた。赤名では，基肥として， $4\ g\ N\ m^{-2}$ ， $10\ g\ P\ m^{-2}$ ， $5\ g\ K\ m^{-2}$ が，追肥として，出穂3週間前と2週間前に $2\ g\ N\ m^{-2}$ と $2.3\ g\ K\ m^{-2}$ を与えた。高槻では基肥として， $3\ g\ N\ m^{-2}$ ， $8\ g\ P\ m^{-2}$ ， $3.5\ g\ K\ m^{-2}$ が，追肥として，出穂3週間前に $3\ g\ N\ m^{-2}$ と $3.75\ g\ K\ m^{-2}$ を与えた。栽植密度と施肥量はそれぞれの地域の慣行法に従った。圃場の大きさは松江が $10.5 \times 13.5\ m$ ，赤名が $10 \times 30\ m$ ，高槻が $25 \times 20\ m$ であった。全ての地域で圃場を3つに分割し，3反復した。

松江において，穂揃い後，群落の一部をプラスチックフィルムで覆う高温処理を与えた（高温区）。高さ1.5 m，幅2.1 m，奥行き2.8 mのスチールパイプ枠の天井に，温室用の高透過性ポリエステルシート（シクスライト，大洋工業株式会社，東京）を張り，四隅にはビニールハウス用のポリエチレンシートを緩く垂らせた。天井の中央に直径1 cmの穴を開け，側面のシートは空気交換が自由できるように固定しなかった。内部の気温は1~2℃上昇すると共に，フィルム下で計った光合成有効放射は14%低下し，炭酸ガス濃度は日中最大で6.6%外気より低下した。

高温区では，全生育期間中の地上部乾物重が兩年の平均で屋外に比べ約5%低下した。この低下は，フィルムによる光強度の低下と高温による呼吸消耗（Amthor 1989）のどちらか，あるいは両方によりもたらされた可能性がある。しかし，本結果からのみからはどちらの影響かはわからなかった。気温は圃場に隣接した百葉箱と，フィルム内に直射日光を防ぐように設置した温度ロガーで30分毎に記録し，日平均気温が計算された。

登熟期の乾物生産を増やすために，全ての地点で穂揃い後，標準区に対して一条づつ株を刈り取ることによって栽植密度を半減する間引き処理を行った（間引き区）。間引きは，株の間の光競合を緩和することで同化を促進させる有効な方法の一つである（Evans 1996）。登熟期の間引きは，同時に土壌からの養分吸収の競合を緩和するとしても，光環境の改善が同化に大きく影響したとみなされる。なぜならば，群落条件でポット栽培したイネを登熟期に孤立状態に置くと，土壌養分競合が特に改善されないとみなされるにもかかわらず乾物生産が著しく増えたからである（Kobata et al. 2000）。また，イネの光環境による物質生産の増加に伴う土壌養分の吸収増加は，物質生産増加に基づく二次的結果であると考えられている（武長 1990）。松江においては各反復の外気温区と高温区のそれぞれに間引き区と標準植え区を割り付け，他の地域では間引き区と標準植え区を割り付けた。

穂揃い後約10日おきに各反復から6株づつ採取し，穂とその他に分けて80℃通風乾燥機に48時間以上入れてから，籾とそれ以外の部分の乾物重を測定した。完熟期の稔実籾について籾すり前後の乾物重から平均1粒穀重を求め，各サンプリング時期における籾重からこの粒穀重を差し引いて粗玄米重を推定した（Kobata et al. 2000）。穂揃い後50日頃の完熟期に，各反復から10株を採取し，収量構成要素と収量を求めた。標準植え区の収量および収量構成要素について，年度・地域・高温を処理要因として一元配置の分散分析を行い，Tukey法による5%水準におけるLSDを求めた。完熟期における比重 $1.06 \times 10^3\ kg\ m^{-3}$ による比重選に基づく登熟歩合（ $(\text{精玄米数} / \text{全籾数}) \times 100$ ）の他に， $(\text{粗玄米重} / (\text{精玄米重} \times \text{籾数})) \times 100$ で表される量的な子実の充実を表す充填率（村山 1983，塚口ら 1996，Kobata et al. 2000，Kobata and Uemuki 2004）を計算した。

完熟期の乳白米率は，農林水産省広島食糧事務所松江事務所の判定基準に基づいて目視でおこなった。収量調査サンプル毎に精玄米300粒を調べた。

結果と考察

収量および収量構成要素，乳白米の発生

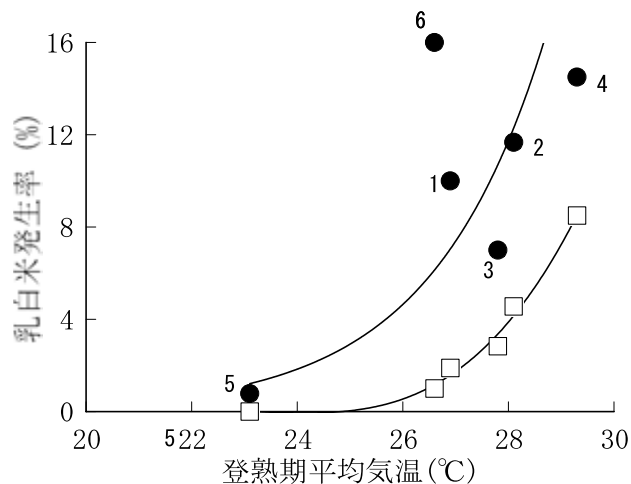
標準区の精玄米収量は，1999年の赤名が最も高く，2001年の高槻が最も低かった（第1表）。松江は兩年とも二地域の中間であった。松江の高温区は，標準区に比べ精玄米

注1. 島根県資料（2003）は島根県農林水産部生産指導課作成「米プロジェクトチームの実施計画」の配布資料。

第1表 1999～2001年に松江、赤名、高槻の三地域で栽培されたコシヒカリの収量、収量構成要素、乳白米発生率、穂揃い後30日間の平均気温。

地域	年 度	収量 g m ⁻²	穎花数 ×10 ³ m ⁻²	登熟歩合 %	1000粒重 g	乳白米発生率 %	平均気温 ℃
松江	標準区 1999	599 ± 7	34.6 ± 0.6	77.9 ± 3.3	19.1 ± 0.4	10.0 ± 1.00	26.9
	高温区 1999	412 ± 35	34.6 ± 0.2	55.4 ± 4.5	18.5 ± 0.0	11.7 ± 0.80	28.1
松江	標準区 2000	591 ± 11	30.4 ± 0.5	83.4 ± 2.6	20.1 ± 0.1	7.0 ± 0.40	27.8
	高温区 2000	428 ± 6	31.9 ± 1.1	60.7 ± 1.0	19.0 ± 0.2	13.2 ± 1.40	29.3
赤名	標準区 1999	669 ± 9	32.0 ± 1.0	87.5 ± 2.1	20.6 ± 0.1	0.8 ± 0.3	23.1
高槻	標準区 2001	576 ± 6	40.4 ± 2.3	60.7 ± 3.2	20.4 ± 0.0	16.0 ± 3.2	26.6
	LSD(0.05)	76	5.5	14.1	0.9	7.3	

各値は3反復の平均値±標準誤差を示す。収量は水分含量14%の値、他は乾物重。高温区は穂揃い期から圃場にプラスチックフィルムをかけて温度を上昇させた。LSDは全ての年度・地域・温度処理を要因として一元配置の分散分析を行い求めた時のTukey testの5%水準における値。



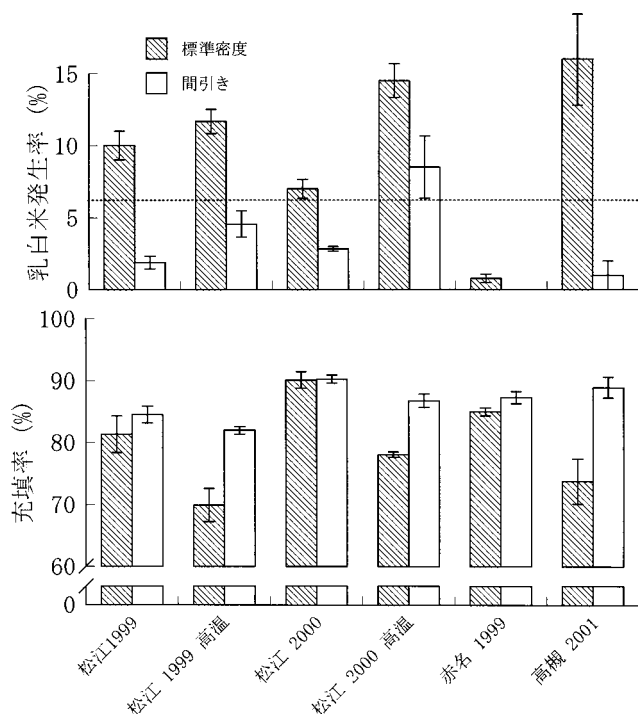
● 標準区 : $f(x) = 2.71 \times 10^{-5} \exp(0.464x)$, $r^2 = 0.755$

□ 間引き区 : $f(x) = 0.044x^3 + -3.115x^2 + 72.913x - 568.279$, $r^2 = 0.752$

第1図 登熟期平均気温（穂揃い後30日間）と標準区の精玄米の乳白米発生率（●）との関係。図中の数字は、1.1999年松江、2.1999年松江高温区、3.2000年松江、4.2000年松江高温区、5.1999年赤名、6.2001年高槻を示す。□は、それぞれの栽植密度を穂揃い後半分に間引いた場合（間引き区）の乳白米発生率を示す。各値は3反復の平均値。

収量を有意に低下させた。このような地域間の収量の違いには、穎花数よりも登熟歩合が強く反映していた。なぜならば、穎花数が極めて多い高槻の収量は登熟歩合が極めて低く、逆に赤名では穎花数が高槻と松江の中間であるにも関わらず登熟歩合と収量が最も高かったからである。また、松江の高温処理による収量低下は登熟歩合の低下に基づいていた。一方、千粒重には地域間、松江の温度処理区間で違いがあるものの、その差は小さかった。すなわち、主に登熟歩合が地域間収量に違いをもたらしていた。精玄米における乳白米発生率は、赤名での0.8%から高槻での16.0%までの違いがあった（第1表）。松江標準区では、7

～10%で、高温区は1.7～6.2%乳白米発生率を増やした。穂揃い後30日間の平均気温は、赤名が最も低く、松江と高槻はほぼ同様であった。松江での高温区は穂揃い後30日間の平均気温を1.2～1.5℃上昇させた。これらの結果から、全体的に登熟期の平均気温が高いほど登熟歩合が低く、乳白米発生率が高い傾向があった。しかし、高槻のように平均気温が松江とほぼ等しいにも関わらず、極めて登熟歩合が低く、乳白米発生率が高い場合があった。登熟期間の積算日射量は、1999年の松江が416 MJ m⁻²、赤名が526 MJ m⁻²、2000年松江が730 MJ m⁻²、2001高槻が462 MJ m⁻²であった。従って、赤名標準区の低い乳白米発生



第2図 各年度、3地域の乳白米発生率と籾の充填率。各値は3反復の平均値と標準誤差を示す。乳白米発生率の点線横棒は一等米基準の目安。

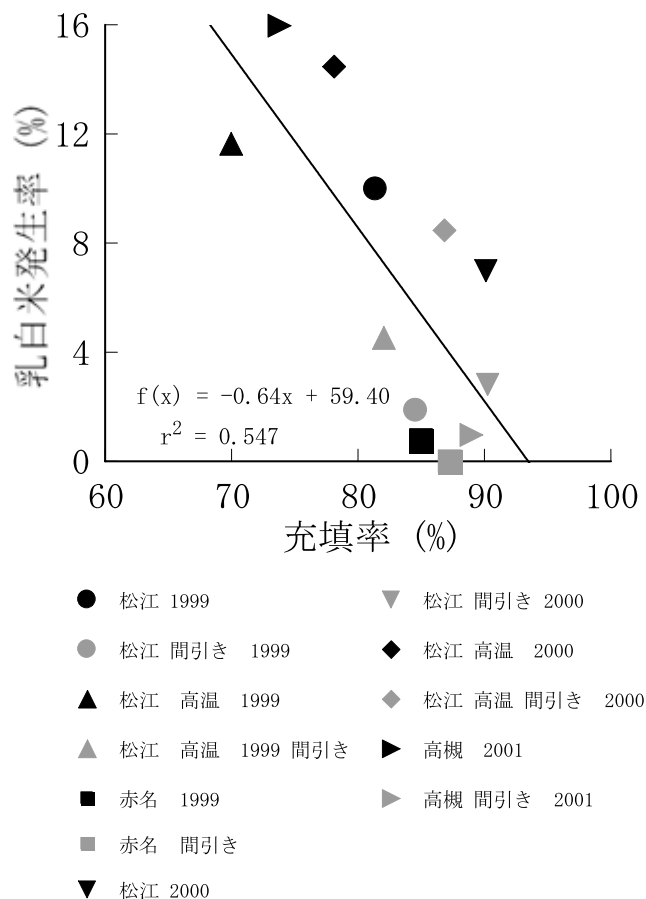
率や、1999年に比べて2000年松江におけるやや低い乳白米発生率は、登熟期の日射量が多かったためである可能性がある。ただし、高槻では登熟期の日射量が他地域に比べて低くなくても乳白米発生率が極めて高かったことから、生育初期からの高温 (Kobata and Uemuki 2004) による窒素吸収促進がもたらした極めて多い着生穎花数が登熟歩合の低下と乳白米発生を高めたと考えられる。従って、気温と登熟歩合あるいは乳白米発生率との関係には、多数の穎花着生による同化産物分配の不足 (松島 1959) が登熟期の日射条件以上に強く関与していると見なされた。

穂ぞろい後30日間の平均気温と乳白米発生率との関係

穂揃い後30日間の平均気温と乳白米発生率との間には、地域、高温区を込みにして正の関係が見られた (第1図)。この関係は、従来得られていた関係 (横山 2002, 古土井 2002) と近似していた。ただし、気温26℃以上で乳白米発生率は大きければつきを示した。これは、高槻のように気温が松江に比べて特に高くなくにもかかわらず乳白米発生率の高い場合が含まれているためである。

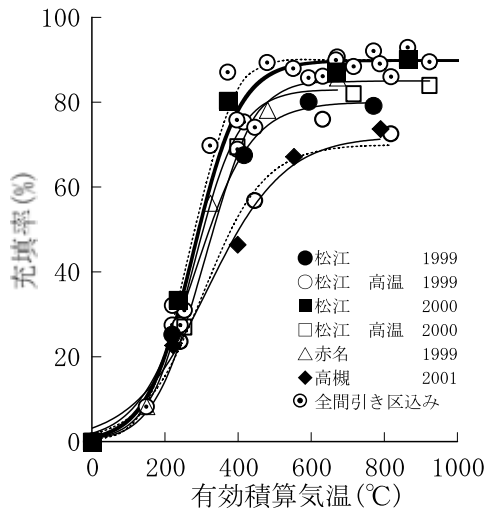
間引きの乳白米発生率への影響

本試験区の間引きは全ての区で乾物生産を11~18%増加させ、その結果子実の乾物増加速度が5~22%増加した (Kobata and Uemuki 2004)。登熟が停止する穂揃い後40日の子実の充填率を見ると、標準区の70~90%から間引によって5~15%増加した (第2図)。間引区の乳白米発生率



第3図 各年度、地域の標準区と間引き区のイネの乳白米発生率と籾の充填率との関係。各点は3反復の平均値。

は、元々極めて値の低かった赤名を除いて大きく減少した。特に1999年松江標準区と高温区、2000年松江高温区、高槻で乳白米発生率軽減の効果が大きかった。間引き区の乳白米発生率は一等米の品質限界の目安であるとされる6%の乳白米発生率 (島根農試 2002) を、2000年の松江高温区ではやや上回るものの、他の区は全て下回った。また、全てのデータを込みにすると充填率と乳白米発生率の間には負の関係があり、子実の乾物充実が低いと乳白米が増加した (第3図)。すなわち、子実の同化産物供給を高めると、充填率が増えると共に、乳白米発生率が大きく減少することがわかった。その一方で、間引きをした場合でも穂揃い後30日間の平均気温と乳白米発生率の間には正の関係が見られた (第1図)。ただし、間引き区の気温に対する乳白米発生率の増加反応は、標準区に比べ小さくなった。これらから、乳白米の発生には、同化産物の供給不足が極めて大きな要因となっていること、ただし、乳白米発生程度は少ないものの間引き区でも温度上昇にともなう乳白米の増加が見られることから、胚乳内での同化産物の移動・蓄積やデンプン合成系等への温度の直接的影響 (寺島 2002, 岩澤ら 2002) の可能性も推察された。



第4図 穂揃い後の有効積算温度（有効下限温度7℃）と充填率との関係。標準区の各回帰式と決定係数は次の通りである。

松江（1999年） $y = 80 / (1 + 80 \exp(-0.01x))$, $r^2 = 0.999$

松江（1999年高温区） $y = 70 / (1 + 75 \exp(-0.02x))$, $r^2 = 0.988$

赤名（1999年） $y = 80 / (1 + 80 \exp(-0.02x))$, $r^2 = 0.996$

松江（2000年） $y = 90 / (1 + 75 \exp(-0.02x))$, $r^2 = 0.999$

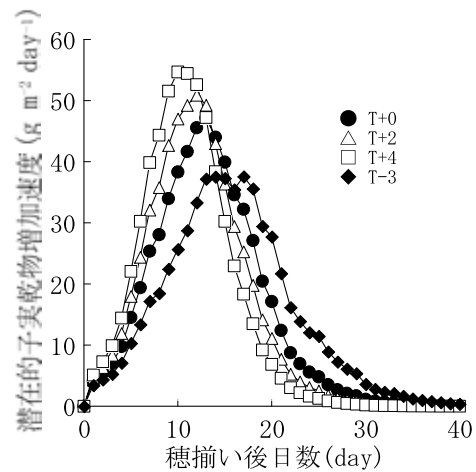
松江（2000年高温区） $y = 85 / (1 + 80 \exp(-0.02x))$, $r^2 = 0.998$

高槻（2001年） $y = 72 / (1 + 70 \exp(-0.02x))$, $r^2 = 0.993$

間引き区では、全区が次の一つの曲線で回帰できた（太線）。 $y = 90 / \{1 + 75.1 \exp(-0.016x)\}$, $r^2 = 0.983$ 。

なぜ温度上昇によって子実への同化産物供給が不足するのか？

籾の充填率の推移は、登熟期の有効積算温度（有効下限温度7℃とした時（江幡1990））を変数とする密接なロジステック曲線で各地域、温度処理区毎に表すことができる（Kobata and Uemuki 2004）（第4図）。完熟期における充填率の最高値は松江高温区におけるように高温下で登熟した場合や高槻のような着生籾数が多い区ほど低い傾向があった。一方、間引き区について両者の関係を見ると、地域、温度処理区にかかわらず、全てを込みにした密接な一つの曲線で近似でき、最終的にはほぼ同じ最高値（90%）に達した。そして、ほとんどの場合、標準区の充填率の増加曲線は、間引き区を下回っていることがわかった。すなわち、間引きによって同化産物が子実に充分供給されれば、地域、温度環境が異なっても充填率は有効積算気温と極めて安定した関係を示した。言い換えれば、潜在的な子実の乾物成長量は高温によっても低下しないことを示している。そのため、同化産物供給が充分行われたときの潜在的な子実の充



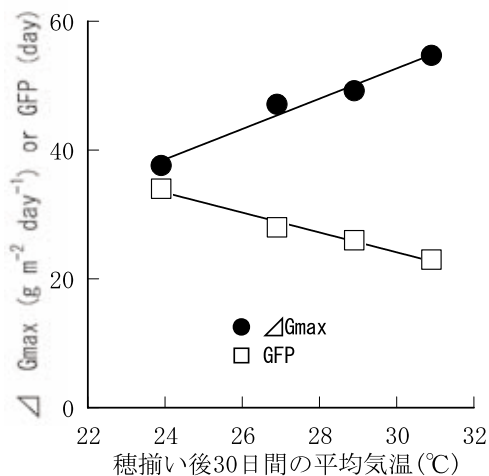
第5図 登熟期平均気温が変化したときに推定される穂ぞろい後の潜在的子実乾物増加速度。

有効積算温度を変数とする関数である潜在の子実乾物重増加速度が、穂揃期以降の毎日の平均気温が1999年の松江の平年値（T+0）、-3、+2、+4℃の時にについて計算された。

増速の増加速度は温度の関数で表せることになる。そして、潜在の子実乾物増加速度（ $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ）は次の関係で表せる。

$$\text{潜在の子実乾物増加速度} = (\text{潜在的充填率増加速度} / 100) \times \text{潜在収量}$$

ここで、潜在的充填率増加速度（ $\% \text{ day}^{-1}$ ）とは、間引き区における有効積算温度を変数とする関数で表される潜在的充填率（第4図）を微分したものである（Kobata and Uemuki 2004）。潜在収量とは（穎花数×一精玄米重、 g m^{-2} ）である。1999年の松江における潜在収量に対して、穂揃い後の毎日の平均気温（T+0）が-3℃低下したとき（-3℃）、2℃（+2℃）、4℃（+4℃）上昇したときの日毎の潜在の子実乾物増加速度を算出した（第5図）。これによると、+2℃の場合、T+0に比べて、最大成長速度は46 $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から50 $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ に、+4℃の場合53 $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ に高まり、一方、-3℃では38 $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ に低下した。また、子実重増加速度が5%以下になったときを登熟停止として登熟期間をみると、T+0が穂ぞろい後約30日であるのに対して、+2℃では穂ぞろい後27日目頃に、+4℃では23日目頃と早まり、一方-3℃では穂ぞろい後35日目頃まで伸びた。すなわち、本推定値は、穂揃い後の平均気温が高いと潜在の子実乾物重増加速度が高かつ登熟期間が短くなり、逆に気温が低いと速度が低かつ登熟期間が長くなるという従来の観察をよく説明している。また、これらの関係を穂ぞろい後30日間の日平均気温との関係としてあらわした場合、潜在の子実乾物増加速度は38 $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から55 $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ の最大145%、登熟期間は34日から23日に最大11日短縮したことがわかる（第



第6図 松江における穂摘い後30日間の平均気温が24℃から31℃に変化したときに計算される潜在的な子実乾物増加速度最大値 (ΔG_{\max}) と登熟期間 (GFP) との関係。登熟期間は、穂ぞろい期から子実の乾物増加速度が ΔG_{\max} の5%以下になったときに終了したと見なした。

6図)．これらの計算された温度上昇時における潜在的子実乾物増加速度の最高値は、登熟期のイネの乾物生産速度(秋田1990)に比べてもかなり大きく、同時に登熟期間の短縮を伴う。高温が登熟期のイネの乾物生産に与える影響は明確ではない(金ら1996)．しかし、一般にイネの光合成速度は気温が33℃以上のように極端に高くなれば変化が非常に少ない(Vong and Murata 1977)のに対して、茎葉を含めた全体の物質生産は暗呼吸の増加(Amthor 1989)によって低下する可能性があることから、登熟期の気温上昇によって同化はほとんど変化しないかあるいはむしろ減少する可能性がある。そのため、潜在的な子実乾物増加速度が高温によって急激に増加し、その期間も短くなると、子実は同化産物の供給不足にさらされやすくなる。すなわち、高温になるほど子実の充填能力が発揮できない状況になると言えよう。このような同化産物供給の不足(第1図・第3図)が充填率の低下と乳白米を発生させると考えられる。

子実の着生部位間での乳白米発生の違いについては、本報告では強勢、弱勢穎花における乳白米発生を分けて解析していないので明らかではない。従来、登熟期の高温は子実の乾物増加速度を高め一方で登熟期間を短縮するために、成長の優勢な子実とそうでないものとの間に競合が大きくなり、優勢でない子実が乳白米になりやすいとされている(長戸・江幡1965)．これに対し、圃場観察では、弱勢穎花で乳白米発生が多かったという結果(津森1987)の一方で、強勢穎花においても乳白米が多かったという観察があり一定しない(角田1987)．穎花間の乳白米発生の差が、穎花着生位置の違いを反映しているのか、弱勢穎花の多さが総着生穎花数を増やして(松島1959)同化産物の

不足を促進し、成長の遅い弱勢穎花の乳白米発生を増加させているのかは明らかではない。

近年のコシヒカリにおける乳白米発生の増加が、子実への同化産物供給の不足に強く影響されていることを裏付けるデータがある。島根県において乳白米が多発した1998年と1999年と発生の少なかった1997年におけるコシヒカリの登熟期の大部分を含む8月の松江、出雲地区の平均気温、最高気温の温度差は平均で0.5℃程度にすぎない(気象業務支援センター2003)．一方、1998年と1999年の一ヶ月の日照時間は1997年に比べ50～80時間も減少していた。すなわち、気温が著しく上昇していないにもかかわらず、日照時間の減少によって乳白米発生率が増加したとみなせる。また、本報告において、赤名では登熟期の気温が低くさらに登熟期日射量が多いことが高い収量と低い乳白米発生率をもたらしたと見なされた。これらの結果は、栽培条件下では気温上昇の直接的影響よりも低日射による同化産物の不足が乳白米発生の原因として大きいという推定を裏付けている。

乳白米防止は可能か？

高温によって直接子実のデンプン合成酵素や胚乳内の同化産物の転流・移行等の能力が影響される(寺島2001, 岩澤2002)結果、乳白米が発生するのならば、植え付け時期を遅らせて登熟期間を低温に置く以外に有効な乳白米防止の対処方法はないであろう。しかし、本報告では間引き処理によって圃場条件下での乳白米発生をほぼ一等米基準以内に抑制することができたことから、同化産物の供給不足が栽培条件下での乳白米発生の主要原因であることが示唆された。また、従来同一環境条件でも着生粗数が多いほど、生育中期以降の葉色が落ちやすいほど、落水が早いほど、また根腐が起きやすい時ほど乳白米が発生しやすい(津森1987, 寺島2001, 横山2002, 古土井2002, 島根農試2002)ことが観察されている。これらの条件はいずれも登熟期の同化を抑制する要因である。なぜなら、着生粗数が多いと登熟歩合の低下として現れるように粗当たりの同化産物供給が不足し(松島1959)、葉色の低下は窒素濃度の低下から(石原ら, 1979)、また落水(小葉田・高見, 1981)と根腐(Jiang et al. 1994)は葉身水ストレス増加による気孔閉鎖によって葉身の光合成速度を低下させるからである。このことは、高温による子実乾物増加速度の上昇により子実の同化産物要求が増加しているときに、同化生産を減少させるような栽培あるいは環境条件が、子実への同化産物供給不足をさらに大きくして、その結果乳白米の発生が増えることを示唆している。言い換えれば、高温下であっても登熟期の子実への同化供給を促進することができれば、乳白米発生の抑制が可能であることを示唆している。これは二つの方法によって可能であろう。一つは、穎花数を減らして相対的に穎花への同化産物供給量を増やすことである。実際に、窒素施肥の減少により穎花数を減

らす(松島, 1959) ことが乳白米発生防止に有効に働くことが広く観察されてきた(高橋 1998, 島根農試 2002 など)。もう一つは、穎花数が決定した後(穂揃期前後)に、登熟期の同化を窒素追肥等によって増加させることである。後期施肥は、子実の窒素含量の増加を招き食味を低下させるために減少あるいは省略が推奨されている(青木・湯浅 1995, 高橋 1998) としても、どの程度食味が低下するのかと共に、検討に値する有効な方法であろう。また、品種特性としては、子実への同化産物供給を増やすという点から、穎花数が余り多く着生しないこと、茎葉の出穂前貯蔵炭水化物が高く登熟期初・中期の同化能力が高いこと、また高温に対して子実の乾物増加速度が高くなりにくい特性が乳白米発生防止に有効であろう。なお、本報告では背白米、腹白米、基白米などの品質低下米は含まれていない。背白米や基白米の発生には、品種の遺伝的要因が関与している一方で、乳白米発生は登熟期の環境要因の影響を強く受けることが示唆されている(飯田ら 2002)。このことから、栽培技術的に乳白米発生を防止できる可能が考えられる。

コシヒカリは倒伏防止や食味向上の観点から、施肥量を従来の品種に比べかなり制限する施肥体系が取られてきた(青木・湯浅 1995)。近年、夏期の気温上昇が確かに起きているとしても(寺島 2002, 気象業務支援センター 2003)、長期的な施肥量の抑制や作業上の落水の早期化、作業機械による耕作深度の低下などが登熟期における同化を抑制する条件となり、高温や低日照が促進要因となって乳白米発生を増やしている可能性がある。また、従来の施肥体系が、基肥や分けつ期追肥によって分けつ数を増加させ、さらにそれらの分けつ上に幼穂形成期追肥によって穎花数を確保し、その後、穎花数に十分見合った同化産物を供給するための穂揃期追肥をおこなうという一連の理論体系を持つ(松島 1959) にもかかわらず、近年の施肥が品質向上のために登熟期の同化向上をもたらす後期追肥のみを大きく抑制するという、乳白米を発生させやすい条件を作っていると考えられる。乳白米発生の抑制には、イネの直接的な温度反応性のみならず、施肥や栽培方法を含めた登熟期の子実への同化産物供給を増やす視点からの、施肥等の全体的な栽培体系の見直しが必要であろう。

謝辞: 栽培にご協力いただいた島根県農業試験場赤名分場(現島根県中山間地域研究センター)の皆さんに深謝します。また、乳白米の判定方法をご教示いただいた農林水産省広島食糧事務所松江事務所、および高槻のサンプルにおける乳白米判定をしていただいた本学大学院生長野智徳氏に感謝します。

引用文献

- 秋田重誠 1990. 第5章 個体群の乾物生産. 稲学大成 第2編 生理編. 松尾高嶺ら編. 農文教, 東京. 509—544.
Amthor, J. S. 1989. Respiration and Crop Productivity. Springer-Verlag, New York, USA.

- 青木研一・湯浅佳織 1995. 第1節 栽培適地, 第11章 普及指導・営農計画, コシヒカリ. 日本作物学会北陸支部・北陸育種談話会編, 534—538.
有坂通展 2001. 新潟県における水稻の品質低下の実態と今後の課題. 北陸作物学会報. 36: 103—104.
飯田幸彦・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.
江幡守衛 1990. 有効積算温度とイネの生長 第2報 イネの出穂・開花および登熟における有効積算温度. 日作紀 59: 233—238.
Evans, L. T. 1996. Crop Evolution, Adaptation and Yield. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
古土井悠 2002. 広島県における「コシヒカリ」の1等米比率と気温の関係. 日本作物学会中国支部研究集録. 43: 16—17.
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・萩原義邦・新田洋司 2002. 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 2)72: 92—93.
石原邦・飯田修・平沢正・小倉忠治 1979. 水稻葉身の窒素濃度と光合成速度との関係—気孔開度・気孔伝導度に着目して—. 日作紀 48: 543—550.
Jiang, D. A., T. Hirasawa, and K. Ishihara 1994. Depression of photosynthesis in rice plant with low root activity following soluble starch application to the soil. Jpn. J. Crop Sci. 63: 531—538.
金漢龍・堀江武・中川博視・和田晋征 1996. 高温・高CO₂濃度環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響 第1報 生育, 乾物生産および生長諸性質について. 日作紀 65: 634—643.
気象業務支援センター. 2003. 電子閲覧室. <http://www.data.kishou.go.jp/index45>.
小葉田亨, 高見晋一 1981. 登熟初期の水ストレスがイネの穀実生長, 乾物分配および玄米収量に及ぼす影響. 日作紀 50: 536—545.
Kobata, T., M. Sugawara, and S. Takatu. 2000. Shading during the early grain filling period does not affect potential grain dry matter increase in rice. Agron. J. 92: 411—417.
Kobata, T. and Uemuki, N. 2004. High temperatures during the grain filling period do not reduce the potential grain dry-matter increase of rice. Agron. J. 96: 406—414.
松島省三 1959. 稲作の理論と技術. 養賢堂, 東京. 196—206.
松村 修 2001. 乳心白粒の発生とその生理機構. 北陸作物学会報. 36: 100—102.
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.
村山 登 1983. 収量漸減法則の克服. 養賢堂, 東京. 52—54.
長戸一雄 1952. 心白・乳白米およ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發育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀 34: 59—66.
西尾博之・橋本俊司 1997. 登熟期間の気温がコシヒカリの玄米品質に及ぼす影響. 日本作物学会中国支部研究集録. 38: 70—71.

- 島根農試 2002. 高温登熟条件下における乳白粒発生を抑制する「コシヒカリ」の適性初数. 平成 13 年度近畿中四国農業研究成果情報. 近畿中国四国農業試験場研究推進会議・近畿中国四国農業研究センター. 89—90.
- 高橋真二 1998. 米の蛋白質含有率を指標とした穂肥施肥法. 日本作物学会中国支部研究集録. 39 : 34—35.
- 武長 宏 1990. 第 4 節 環境要因と養分吸収. II 栄養生理と水分生理. 稲学大成 第 2 編 生理編. 松尾高嶺ら編. 農文教, 東京. 204—214.
- Tashiro, T. and I. F. Wardlaw. 1991. The effect of high temperature on kernel dimensions and the type of occurrence of kernel damage in rice. *Aust. J. Agric. Res.* 42 : 485—496.
- 寺島一男・斉藤祐幸・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.
- 塚口直史, 堀江武, 大西政夫 1996. 水稻の登熟に及ぼす登熟初期の非構造的炭水化物の影響. 日作紀 65 : 445—452.
- 津森重邦 1987. 乳白米の発生要因と対策. 農及園. 62 : 1161—1165.
- 角田和美 1987. 乳白米等の発生機作. 農及園. 62 : 831—835.
- Vong, N. Q. and Y. Murata. 1977. Studies on the physiological characteristics of C3 and C4 crop species. 1. The effects of air temperature on the apparent photosynthesis, dark respiration and nutrient absorption of some crops. *Jpn J. Crop. Sci.* 46 : 45—52.
- 安庭誠・下坪訓次・北川壽 1993. 米粒における光合成産物の蓄積分布に対する温度の影響. 日作紀 (別) 62 : 278—279.
- 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. 35 : 51—66.

Shortage of Assimilate Supply to Grain Increases the Proportion of Milky White Rice Kernels under High Temperatures :

Tohru KOBATA¹⁾, Naoya UEMUKI²⁾, Tatuya INAMURA³⁾ and Hisashi KAGATA³⁾ (¹⁾ Shimane University, 1060 Nishikawatu-cho, Matusue, 690-8504, Japan; ²⁾ Satake Co. 2-30 Saijyo Nishihon-machi, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8602, Japan; ³⁾ Kyoto University, 12-1 Hatcho-nawate-cho, Takatuki, Osaka, 569-0096, Japan)

Abstract : Increase in the proportion of milky white rice kernels (MWK) has seriously affected rice quality in west Japan during the last half-decade. Rising of temperature has been considered to be the primary cause of the spread of MWK. It is suspected that a lack of assimilate supply to grains increases the proportion of MWK, because high temperatures during the grain-filling period could increase the grain growth rate without profoundly affecting assimilate production. Our objective was to determine whether MWK in the higher temperature conditions could be reduced if assimilate supply during the grain-filling period met the requirement for realizing the accelerated grain-growth rate. Rice cv. Koshihikari was grown at three locations in western Japan over three years. At one location, plots were covered with plastic-film during the grain-filling period to increase temperature. When the mean temperature ranged between 23 and 29 °C during the grain-filling period, the rate of MWK varied between 1 and 16% and spikelet filling percentages (F%) at maturity ranged between 70 and 90%. When the plots were thinned to half density during the grain-filling period, all F% attained a ceiling of 90%. MWK almost decreased to below 6%. Hence, thinning can overcome the lower F% and higher MWK. These results suggested that a lack of assimilate supply to the grains resulted in MWK. Any technique that increases assimilation after the heading will be suitable for decreasing MWK.

Key words : Grain, High temperature, Milky white rice kernel, Rice, Spikelet filling percentage.