

深水栽培による高品質米生産技術 —深水栽培が水稻の生育と米粒外観品質に及ぼす影響—

千葉雅大^{1,2)}・松村修¹⁾・寺尾富夫¹⁾・高橋能彦²⁾・渡邊肇²⁾

(¹⁾ 中央農業総合研究センター, (²⁾ 新潟大学大学院自然科学研究科)

要旨: 深水栽培による籾数制御と草姿の改善により, 水稻の登熟期における高温による白未熟粒の発生抑制を試みた. 2004年から2007年に, 水稻3品種(初星, ササニシキ, コシヒカリ)を分げつ盛期から最高分げつ期にかけて水深18 cmで深水処理し, 生育, 収量と白未熟粒割合を調査した. 深水処理により, 2次分げつおよび上位1次分げつといった弱小分げつが減少して, 強勢な下位の1次分げつの穂を中心とした分げつ構成となり, 有効茎歩合が高まった. その結果, 深水処理により穂数は減少したが, 一穂籾数と玄米千粒重が増加し, 年次変動はみられたが, 慣行栽培と同程度の収量が得られた. 深水処理により白未熟粒発生が抑制され, 特に, 乳白粒の発生を顕著に抑制した. また, 深水栽培は, オープントップチャンバーによる高温処理においても白未熟粒発生を抑制し, 高温による品質低下防止に効果があった. この効果は, 高温登熟耐性の弱い品種ほど顕著であった. しかし, 深水処理は茎数を減少させるため, 十分な茎数が確保できない場合には減収した. このため, 高品質米の収量確保には, 有効茎数を確保してから深水処理を開始することが必要であり, 深水処理開始時の茎数が330本/m²程度確保できれば, 慣行栽培と同程度の収量と, 白未熟粒発生抑制の両立が期待できる.

キーワード: イネ, 高温ストレス, 白未熟粒, 品種, 深水栽培.

近年, 化石燃料の使用による大気中の炭酸ガス濃度の増加により, 地球温暖化が進行している(IPCC 2007). このため, 登熟期の気温上昇により, 白未熟粒発生が増加して, 一等米比率の低下が問題になっている(農林水産省水稻高温対策連絡会議対策推進チーム 2006). 高温登熟に対する対策として, 新潟県や富山県では出穂を遅らせて登熟期の高温を避けるために, 移植時期を後退させている(新潟県農林水産部 2005, 富山県農林水産部 2005). しかし, 出穂時期が遅れても登熟期の気温が十分に低下しない地域もあり, 移植時期の移動が効果のある地域は限られる(松村 2005, 坂田・高田 2006)ため, 他の有効な方法の開発が望まれる.

白未熟粒の発生には籾数が関係することは知られており, 籾数が増加すると乳白粒割合は増加する(井上ら 2004, 高橋 2006)ことから, 籾数を適正範囲に誘導する必要性が提唱されている(寺島ら 2001, 松村 2005). その1つの方法として疎植栽培が検討されており, 高橋(2006)はコシヒカリの栽植密度を16~18株/m²にすると, 葉色が維持され品質が向上することを報告している. また, 井上ら(2004)は, コシヒカリの栽植密度が低いほど完全粒歩合が高まることを報告している. しかし, 疎植にすれば必ず品質が向上するわけではなく, 過度の疎植(11.1株/m²)では, 一穂籾数の増加によって乳白粒が増えること(高橋 2006)が報告されている. 一方, 疎植で品質が変わらないという報告も多く, ヒノヒカリでは, 栽植密度が

11.1株/m²でも外観品質が変わらないこと(山田ら 2003, 木村ら 2005), コシヒカリでも, 栽植密度が10株/m²と低くても品質は変わらないこと(大橋・今井 2004), および18.5~23.8株/m²の間では品質への影響は小さいこと(福島ら 1997)が報告されている. また, 栽植密度が低いほど単位面積あたり籾数も減少する(井上ら 2004)ために, 過度の疎植は避ける必要があり, 収量上適正な籾数はコシヒカリでは26000~32000粒/m²の範囲にあるとされている(近藤 2007).

疎植に対して, 適正籾数に誘導するもう一つの方法として, 深水栽培があげられる. 深水栽培では慣行の水管理に比べて, 弱小分げつの発生が抑えられ, 有効茎歩合が高まることが知られている(錦ら 1988, 古谷ら 1991, 大江・三本 1998, 渡邊ら 2006a). そのため, 一株の穂数が減少して, 逆に一穂籾数が増加する穂重型の生育を示し, 千粒重が大きく登熟歩合が向上するため, 単位面積あたりの籾数は減少しても, 慣行と同程度かやや高い収量が得られる(桐山・中谷 1987, 錦ら 1988, 古谷ら 1991). したがって, 深水栽培は疎植栽培と同様に, 収量を減少させることなく, 過剰分げつを抑制することにより, 籾数を制御することが可能な技術である. この栽培法を適用することによって, 籾数の減少により米粒外観品質の向上が期待できる. ただし, 疎植栽培でも深水栽培でも, 有効茎歩合が高まって, 穂重型の生育を示すことは同じだが, そのメカニズムは異なる. 深水栽培では分げつ発生が抑制されて一株穂数が減

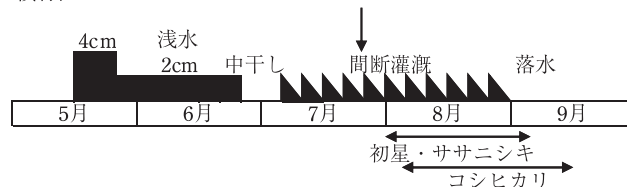
少する(桐山・中谷 1987, 錦ら 1988, 古谷ら 1991)のに対し、疎植栽培では発生した2次分げつが有効化することにより、一株穂数が増加しても、有効茎歩合が高まる(佐藤・清水 1958, 神田ら 1997, Nuruzzaman ら 2000)ことが報告されている。このため、疎植栽培では株内の出穂時期の幅が広がることになり、品質が低下する可能性がある(伊勢ら 1995)。これに加えて、疎植栽培では移植後の茎数制御は困難であるが、深水栽培では水稻の生育に合わせた茎数の制御が可能である。しかしながら、深水処理の時期により水稻の生育に及ぼす影響は異なる。例えば、生育初期から深水処理を行うと、中山間地での収量が不安定になり(渡邊ら 2006a, b)、コシヒカリの倒伏を助長する(古谷ら 1991)。大江・三本(2002)は、深水処理の適期は分げつ盛期から最高分げつ期であり、この時期の処理は弱小分げつの抑制効果が大きく、収量の向上が期待でき、倒伏抵抗性への悪影響もないとしている。倒伏は米粒外観品質の低下を招く(斎藤・深山 1988)ことから、籾数を適正な水準に保つための深水処理時期として、分げつ盛期から最高分げつ期が適当であると考えられる。そこで、本研究では、高温登熟耐性の異なる3品種(初星, ササニシキ, コシヒカリ)について、この時期の深水処理が、生育、収量および品質に及ぼす影響を調べるとともに、オーブントップチャンバーによる高温処理を行い、高温登熟による白未熟粒の発生を深水処理でどの程度抑えることができるか検討した。

材料と方法

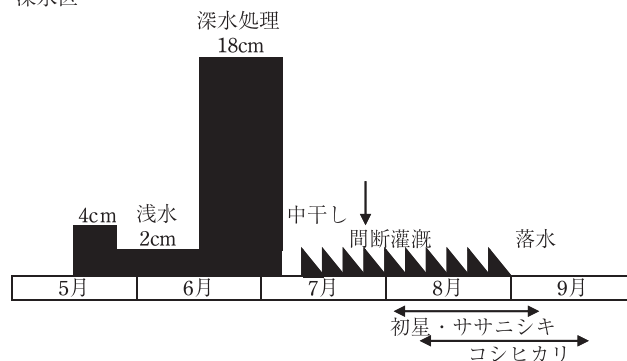
1. 栽培管理の概要

初星, ササニシキとコシヒカリの水稻(*Oryza sativa* L.) 3品種を供試した。米粒外観品質に関する高温登熟耐性は初星とササニシキが弱く、コシヒカリは中程度である(岩下ら 1973, 山川・神田 2003, 若松ら 2005, 石崎 2006)。実験は新潟県上越市の中央農業総合研究センター北陸研究センター圃場で2004年から2007年にかけて行った。ただし、2007年は初星とコシヒカリを供試した。5月中旬に中苗を栽植密度22.2株/m²、1株3本で移植し、基肥とし

慣行区



深水区



第1図 慣行区と深水区における水管理の模式図。

高温区では↓の時から収穫までオーブントップチャンバーで高温処理を行った。←→は登熟期を示す。

て化成肥料(N, P₂O₅, K₂Oを各15%含有)を成分で0.3 kg/a, 穂肥として硫酸をN成分で0.2 kg/aを施用した。

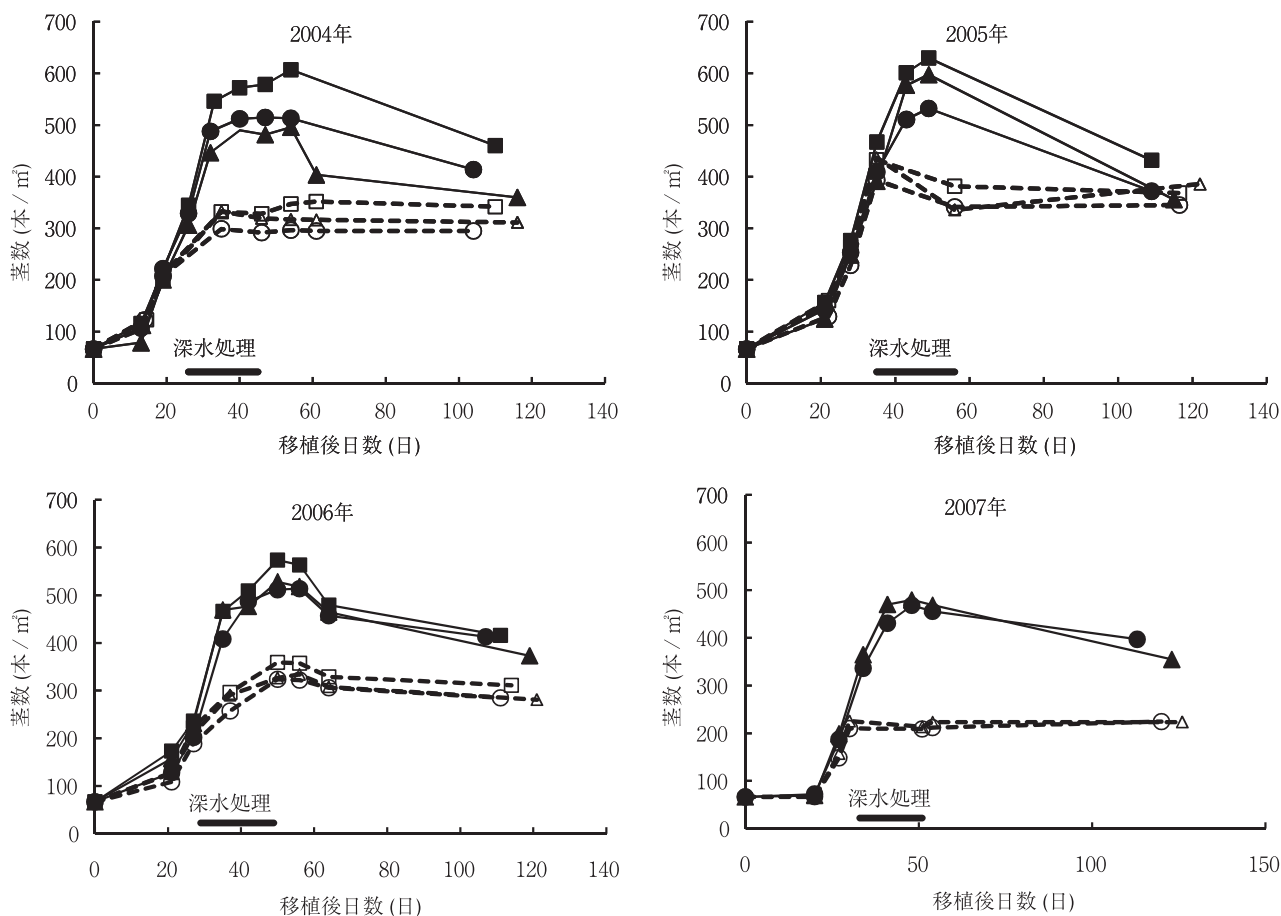
2. 水管理

慣行の水管理を行う慣行区と深水処理を行う深水区を設けた(第1図)。慣行区では、移植直後は水深4cm程度、活着後は2cm程度の浅水で管理し、6月下旬に落水し、圃場にヒビが入る程度まで中干しした。その後は間断灌漑で管理し、8月末に落水した。

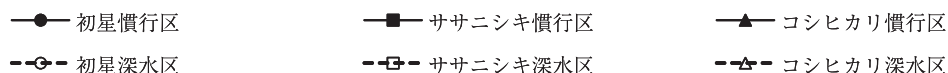
深水区では、移植直後は慣行区と同様の管理を行い、分げつ盛期から最高分げつ期と考えられる6月中旬から7月上旬の約20日間(2004年:6月15日~7月4日, 2005年:6月20日~7月12日, 2006年:6月15~7月5日, 2007年:6月18日~7月6日), 水深18cmの深水処理を行った。深水処理終了後、1週間程度の中干しを行い、その後は慣

第1表 慣行区と深水区の出穂後20日間の平均気温。

品種	試験区	出穂後20日間の平均気温(℃)				
		2004年	2005年	2006年	2007年	平均
初星	慣行区	27.35	27.16	26.71	28.17	27.35
	深水区	27.14	27.23	26.95	28.18	27.37
	深水区-慣行区	-0.21	0.07	0.23	0.01	0.02
ササニシキ	慣行区	27.04	27.16	26.89		27.03
	深水区	26.84	27.27	27.01		27.04
	深水区-慣行区	-0.20	0.11	0.12		0.01
コシヒカリ	慣行区	25.15	27.19	27.01	28.12	26.87
	深水区	24.75	26.72	27.20	28.74	26.85
	深水区-慣行区	-0.40	-0.47	0.19	0.62	-0.01



第2図 深水処理が品種の茎数推移に及ぼす影響。



行区と同じ水管理を行った（第1図）。

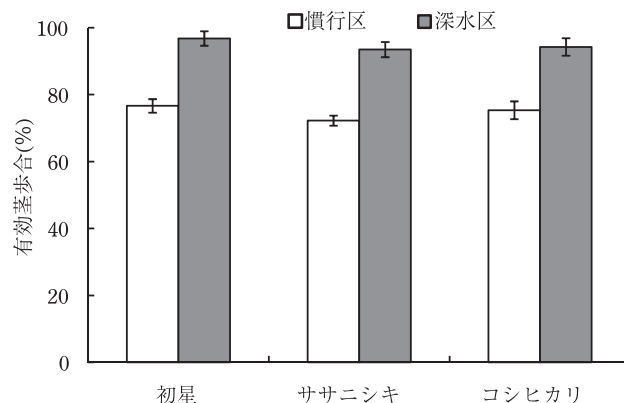
水深18 cmの深水処理が可能な圃場が限られているため、水管理については反復を設けず、試験区内で品種を2004年から2006年は2反復、2007年には3反復で配置した。1反復の面積は、慣行区66~100 m²、深水区23~35 m²であった。そのため、処理間差の検定は年度を反復とした分割区法で分散分析を行った。統計処理はSASのGLM（SAS Institute Japan）を用いた。

3. 高温処理

2005年から2007年にかけて出穂直前に圃場1.8 m×1.8 mを高さ1.5 mの防霧農業用ビニール（MKVプラスチック、ノービエースみらい、厚さ0.1 mm）で囲み、オーブントップチャンバー法による高温処理（千葉・松村2006）を行った。地面からビニールの裾までは3 cmの隙間を空けた。

4. 調査項目

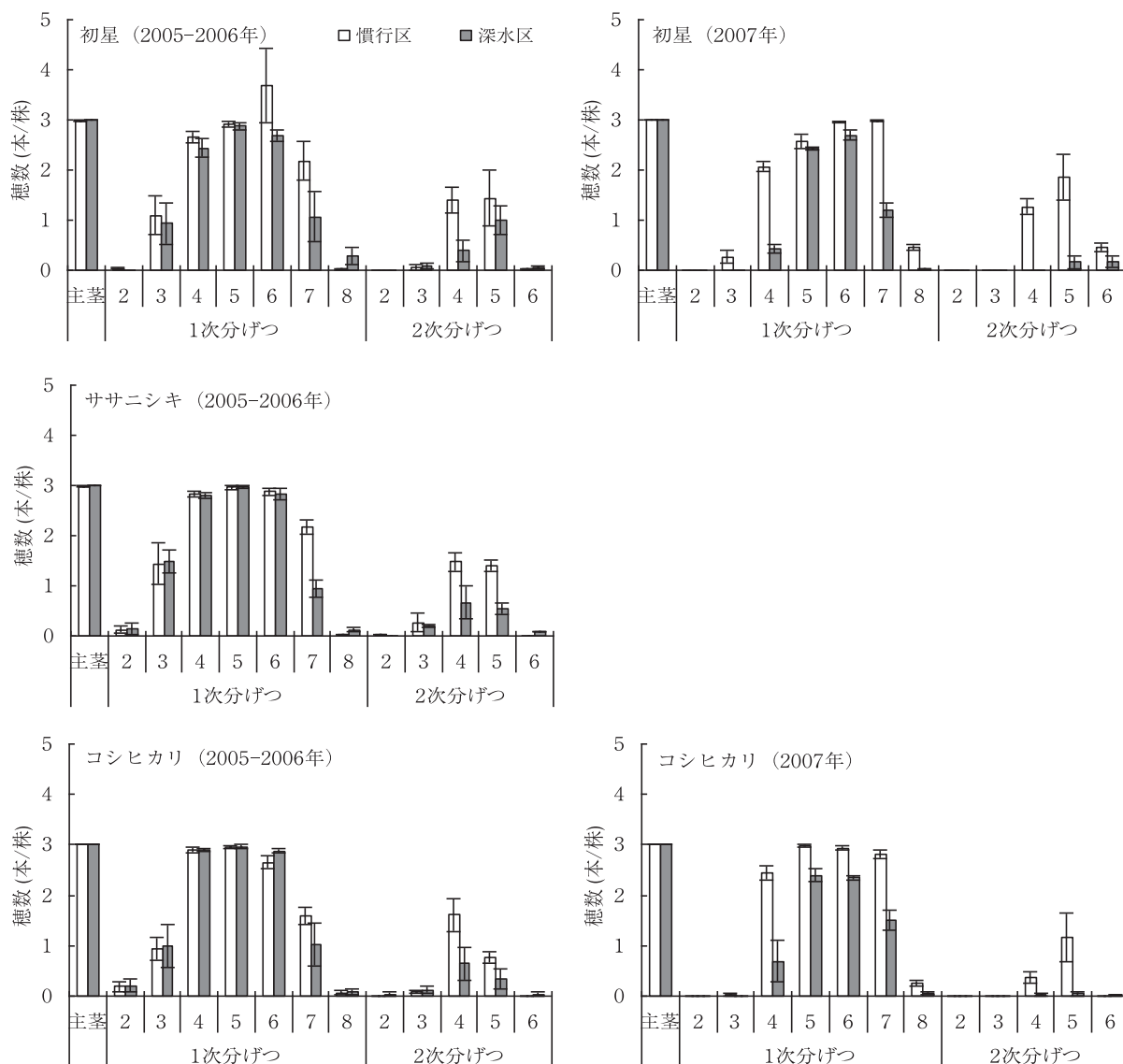
茎数の推移、節位別の分けつ構成、収量と収量構成要素、米粒外観品質を調査した。分けつ調査は、反復ごとに中庸



第3図 深水処理が品種の有効茎歩合に及ぼす影響。

縦棒は標準誤差を示す。茎数調査終了後に、穂数が増加した場合は有効茎歩合を100%として計算した。初星とコシヒカリは2004~2007年、ササニシキは2004~2006年の平均。

な12株を調査株とした。分けつを節ごとに1次分けつ、2次分けつ、3次分けつに分けた。また、反復ごとに20株をサンプリングして、脱粒、粃摺り後に1.8 mmの縦目篩で選別し、収量を求めた。登熟歩合は比重1.06で塩水選



第4図 節位ごとにみた穂の分げつ構成。

縦棒は標準誤差を示す。すべての年次、品種、試験区で3次分げつは有効化しなかった。

して調べた。品質調査は、反復ごとに10株をサンプリングして玄米を1.8mmの縦目篩で選別し、穀粒判別機(静岡製機, ES-1000)にかけ、「乳白粒」、「基部」、「腹白」に分類された粒の合計を白未熟粒とした。この装置は、米粒の表裏および透過画像を解析して判別するが、胚の位置を区別しないため、背白粒と腹白粒の区別はできない。そのため、背白粒の分類項目はないが、主に分類項目「腹白」に分類されると考え、本研究中では「乳白粒」を乳白粒、「基部」を基部未熟粒、「腹白」を背腹白粒と表記した。

結 果

1. 出穂期の変動と登熟期の気象条件

深水区の出穂は、全ての年次で慣行区に比べて遅くなり、その差は初星で1.5~5.3日、ササニシキで1.5~4.0日、コシヒカリでは1.0~3.7日であった。そこで、白未熟粒

の発生に大きく影響する出穂後20日間の平均気温(寺島ら2001)を比較したところ(第1表)、試験年次を平均すると3品種ともに、慣行区と深水区の出穂後20日間の平均気温はほぼ同じであった。出穂後20日間の平均気温を品種間で比較すると、コシヒカリの登熟気温は2004年の低温の影響により、年次を平均しても他の2品種に比べて低くなった。また、ササニシキは高温年の2007年に試験を行っていないため、平均では初星より気温が低くなった。また、上越市の全天日射量は7月末が最大で、以後減少するため、出穂期の遅い深植区では、登熟期の日射量は慣行区より低下した。

2. 茎数の推移

深水処理開始時における茎数は、2004年は330本/m²、2005年は440本/m²、2006年、2007年は220本/m²程度

第2表 深水処理が品種の収量と収量構成要素に及ぼす影響.

品種	試験区	精玄米収量	穂数	一穂粒数	玄米千粒重	登熟歩合	単位面積 あたり粒数
		(kg/10a)	(本/m ²)	(粒)	(g)	(%)	(100粒/m ²)
初星	慣行区	485	381	68.8	23.0	89.4	248
	深水区	463	307	74.3	23.8	91.9	214
	深水区/慣行区(%)	95.4	80.6	108.1	103.5	102.8	86.2
ササニシキ	慣行区	504	414	83.4	21.1	82.4	322
	深水区	524	348	97.1	22.1	87.3	313
	深水区/慣行区(%)	103.9	84.0	116.4	104.7	106.0	97.2
コシヒカリ	慣行区	497	346	86.1	20.8	90.6	282
	深水区	504	308	96.5	21.3	89.3	282
	深水区/慣行区(%)	101.4	89.1	112.0	102.4	98.5	99.9
平均	慣行区	496	380	79.4	21.7	87.5	284
	深水区	497	321	89.3	22.4	89.5	269
	深水区/慣行区(%)	100.3	84.4	112.4	103.5	102.3	94.9
有意差	処 理	ns	*	**	*	ns	ns
	品 種	ns	***	***	***	ns	***
	処理×品種	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** はそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意差あり. nsは有意差なし.

年次を反復として分割区法で分散分析(初星, コシヒカリは2004年~2007年, ササニシキは2004~2006年).

であった(第2図). 深水処理の開始により分げつの発生が停止(2004年, 2005年, 2007年)するか, 抑制(2006年)された. 慣行区では, 最高茎数は深水区を上回ったが, その後無効化する分げつが増加し, 有効茎歩合は80%以下となった(第2図, 第3図). 一方, 深水区では無効化する分げつが少なく, 有効茎歩合が93.5~96.8%と高い値を示した(第3図). そのため, 深水区では穂数が2005年には慣行区と同程度を示し, 2004年には慣行区の71~87%を確保できた. 2006年, 2007年は深水処理開始時の茎数が少なかったが, 2006年には処理中に茎数が増加したため, 穂数は慣行区の69~75%であった. しかし, 2007年は深水処理中の茎数増加がほとんど無く, 最終的な穂数は慣行区の半分程度に減少した.

3. 穂の分げつ構成

第4図に, 各処理区および品種における分げつ構成を示した. 2007年は2005年, 2006年と分げつ構成が異なり, また, ササニシキを供試していないため, 他の2年の平均と別に示した. 慣行区では, 4~7号の1次分げつの穂が多く, 4, 5号の2次分げつも有効化した. 深水区では, 2005年, 2006年には強勢な4~6号の1次分げつが多く, 弱勢な7号1次分げつおよび2次分げつは慣行区に比べて減少した. 2007年の初星とコシヒカリでは, これに加えて, 4号1次分げつも減少し, 2次分げつは皆無であった.

4. 収量および収量構成要素

4年間を通した慣行区と深水区の平均収量は, 3品種とも有意差がなく, 深水区でも慣行区と同等の収量が得ら

れた(第2表). 収量構成要素をみると, 穂数は3品種とも深水処理により減少し, 減少率は初星, ササニシキ, コシヒカリでそれぞれ19.4%, 16.0%, 10.9%であった(第2表). それに対して, 一穂粒数は深水処理により増加し, 増加率は初星, ササニシキ, コシヒカリでそれぞれ8.1%, 16.4%, 12.0%であった. 初星では, 深水処理による穂数の減少が大きく, 一穂粒数の増加は小さかった(第2表). 単位面積あたり粒数は深水区でやや減少する傾向がみられたが, 処理間で有意な差は無く, 処理×品種の交互作用にも有意差はなかった(第2表). また, 玄米千粒重は深水区で増加し, 増加率は初星, ササニシキ, コシヒカリでそれぞれ3.5%, 4.7%, 2.4%であった(第2表). 登熟歩合については, 深水処理により増加する傾向はあるが, 処理間に有意差はみられなかった(第2表).

また, 収量の年次間の推移をみると, 慣行区ではいずれの品種においても2004年と2006年は少収であり, 2005年と2007年は多収であった(第5図). 深水区では, 2004年と2006年は少収, 2005年は多収であり, 慣行区と同様の傾向がみられた. しかし, 2007年は500 kg/10aを下回り, 少収となり, 特に初星で顕著に減収した.

5. 米粒外観品質

深水処理が白未熟粒の発生に及ぼす影響を第6図に示した. 2005年以降は, オープントップチャンバーによる高温処理を行った. この処理により, 昼温は平均で約0.5℃上昇し, 品種と年次に関わらず白未熟粒割合が高まった. また, 深水処理による白未熟粒の抑制効果が, 高温区, 非高温区のいずれでもみられ, 特に高温登熟耐性が弱い初星で

顕著であった。高温登熟耐性が比較的強いコシヒカリでは2004年、2005年のように白未熟粒の発生が少ない年には水管理による差異がみられなかったが、2006年の高温区や2007年には、深水処理により白未熟粒の発生が減少した。このように品種と年次によっては、深水区和慣行区の白未熟粒割合が同程度になった場合がみられたが、深水区の白

未熟粒割合が慣行区を有意に上回ることとはなく、総じて深水処理の効果は安定していた。

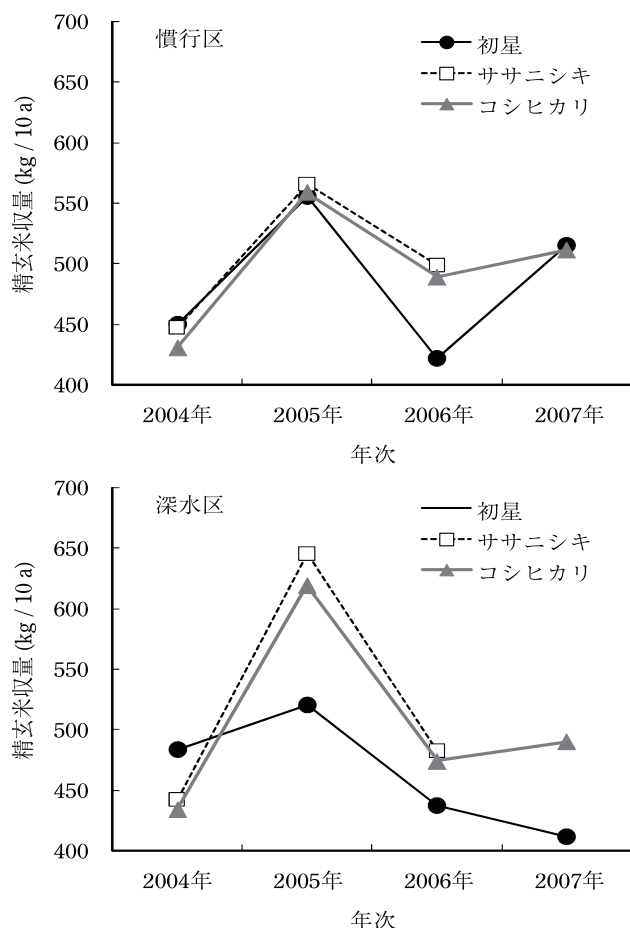
第7図に出穂後20日間の平均気温と白未熟粒割合との関係を示した。3品種とも慣行区と深水区の気温は同程度であるが、深水区の白未熟粒割合は慣行区に比べて低くなった。高温処理によって気温が上昇しても、同様の傾向がみられた。また、初星とササニシキでは、高温処理した深水区の白未熟粒割合は、高温処理をしなかった慣行区より低く、深水処理による白未熟粒の発生を抑制する効果が、高温処理による増加効果を上回った。

単位面積あたり粒数と白未熟粒割合との関係をみると(第8図)、初星では、深水区で粒数が減少し、それに伴って白未熟粒が減少したが、ササニシキとコシヒカリでは粒数の減少幅が小さく、ほぼ同程度の粒数を保ちつつ深水区で白未熟粒割合が減少した。

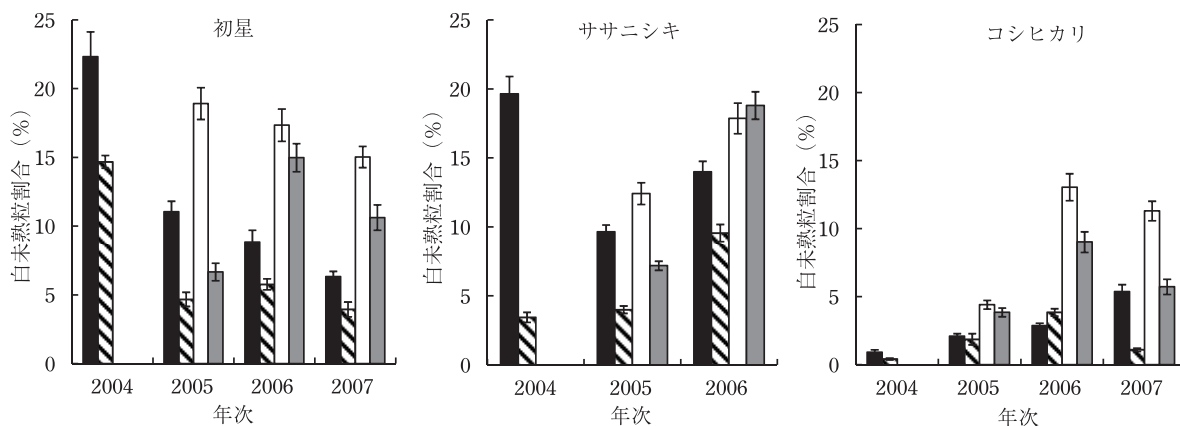
次に白未熟粒を発生部位により、乳白粒、背腹白粒、基部未熟粒に分けて深水処理の影響を解析した(第9図)。深水処理の効果は、乳白粒割合では顕著であり、ササニシキの高温区で有意差がなかった以外は、いずれの品種、温度処理でも減少した。また、基部未熟粒については、初星とササニシキで深水処理による抑制効果がみられたが、コシヒカリでは有意な減少はみられなかった。背腹白粒では初星のみ深水処理による抑制効果がみられ、ササニシキでは有意差は無かった。逆に、コシヒカリの高温区では深水処理により有意に増加したが、その増加幅は0.28%と小さかった。

考 察

深水処理では、白未熟粒の発生を抑制する効果が認められた(第6図、第7図、第8図)。また、この効果は高温登熟耐性が弱い品種で顕著であった。そこで、深水処理が白未熟粒発生に及ぼす影響を詳しく調べるために、白未熟粒を乳白粒、背腹白粒、基部未熟粒に分けて解析した結果、

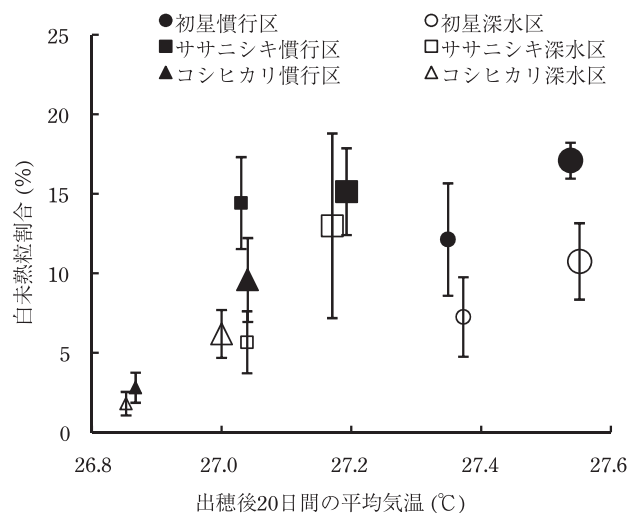


第5図 精玄米収量の年次変動。



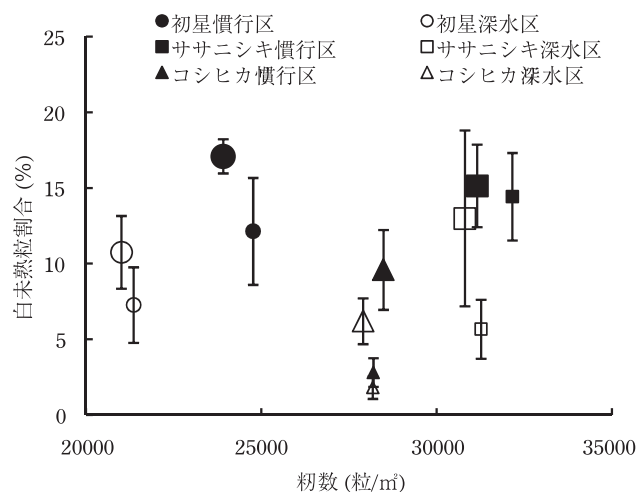
第6図 深水処理と高温処理が白未熟粒割合に及ぼす影響。

■慣行区非高温 ■深水区非高温 □慣行区高温 ■深水区高温
縦棒は標準誤差を示す。



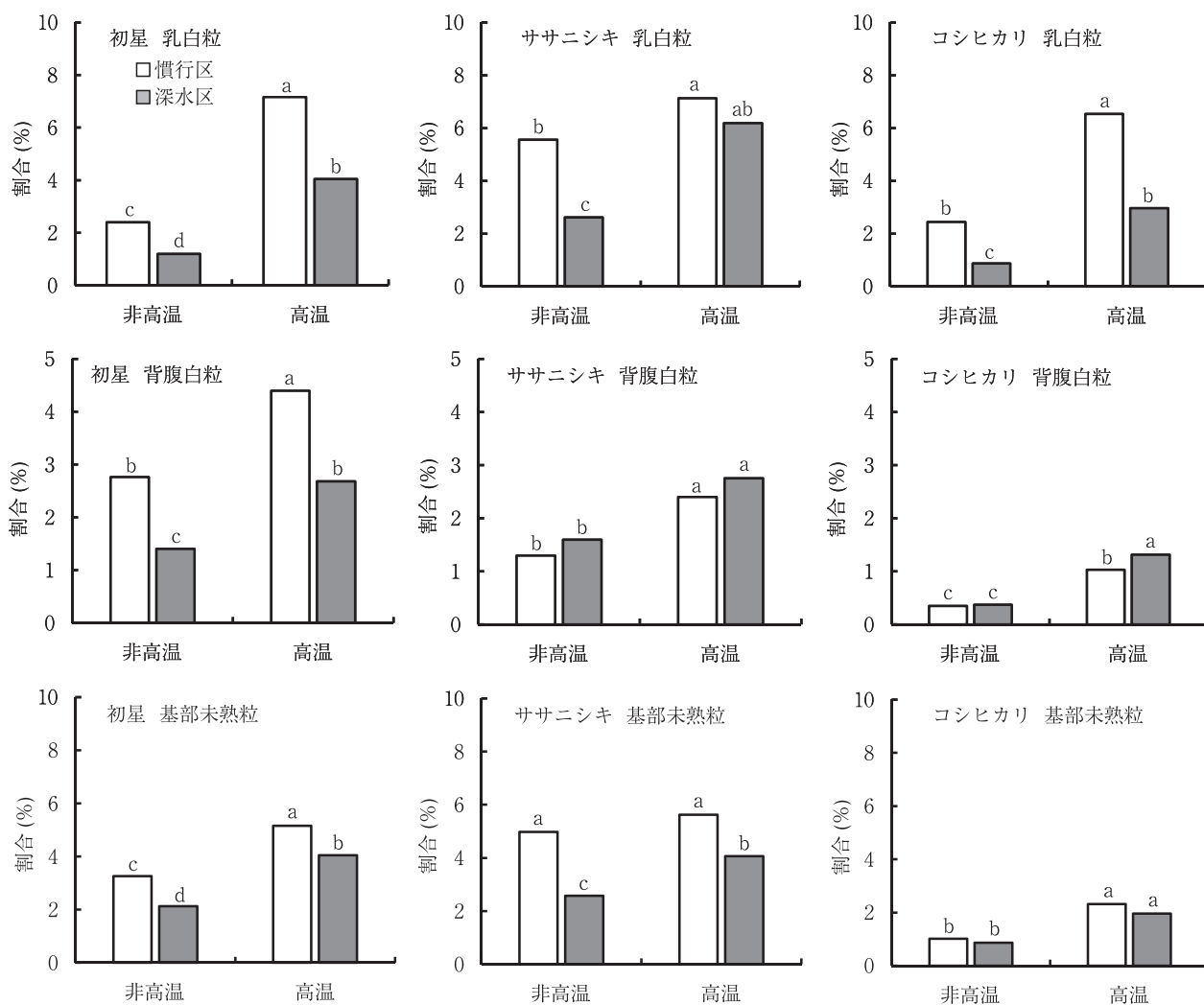
第7図 品種の登熟期気温と白未熟粒割合との関係。

小さい記号は非高温処理区, 大きい記号は高温処理区。
縦棒は標準誤差を示す。平均気温の標準誤差は省略。



第8図 品種の単位面積あたり粒数と白未熟粒割合との関係。

小さい記号は非高温処理区, 大きい記号は高温処理区。
縦棒は標準誤差を示す。粒数の標準誤差は省略。



第9図 深水栽培が品種の乳白粒, 背腹白粒, 基部未熟粒の発生に及ぼす影響。

初星とコシヒカリは2005～2007年, ササニシキは2005～2006年の平均。

同じ記号はWaller-Duncanの方法により5%水準で有意差なし。

乳白粒発生に対する抑制効果がもっとも大きかった (第9図)。次に深水処理による抑制効果が大きかったのは、基部未熟粒発生に対してであり、初星とササニシキで抑制効果がみられたが、コシヒカリでは深水処理による有意な減少はみられなかった。コシヒカリでは乳白粒以外の白未熟粒の発生が少なく、これらの形質では差がみられにくいと考えられる。これらのことから、深水処理は、主に環境条件の影響を受けやすい乳白粒 (朱宮ら 1986) の発生を防いで白未熟粒の発生を抑制すると考えられる。また、この効果は、高温処理の有無を問わず、安定していた。

オープントップチャンバーによる高温処理は、昼温約 0.5°C の上昇であったが、この程度の気温上昇でも、全ての年次と供試品種について、白未熟粒発生の増加効果が認められたことから、この高温処理法は十分機能していると考えられる。供試した3品種ともに非高温処理区と高温処理区の両方で、深水処理により白未熟粒割合が減少する傾向がみられ (第7図)、深水栽培が登熟期の高温による白未熟粒発生を抑制できることが示唆された。特に、初星とササニシキでは深水処理による白未熟粒発生の抑制効果が顕著であり、高温処理の増加効果を上回った。深水処理により出穂期が遅くなることから、登熟期の移動による高温回避の可能性が考えられるが、本試験では出穂後20日間の平均気温の低下はみられず (第1表)、深水処理の白未熟粒発生抑制は、出穂期移動による登熟気温の低下が原因ではなかった。また、深水区の登熟期全天日射量も慣行区に比べて小さく、日射量の増加によって白未熟粒発生が抑制されたわけではなかった。

水稻で白未熟粒が発生する要因は、炭水化物を供給するソース側の要因と受け取るシンク側の要因の2つに分けられる (松村 2006, 森田 2008)。分げつ盛期から最高分げつ期にかけて深水処理を行うことにより、草型が変化するため、シンク-ソース比に影響する可能性が考えられる。深水処理の影響として、2次分げつや上位1次分げつといった弱小分げつの発生が抑制され、有効茎歩合の上昇 (第3図) と、穂数が減少して一穂粒数が増加する穂重型の生育 (第2表) がみられた。これは、従来の知見 (桐山・中谷 1987, 錦ら 1988, 古谷ら 1991, 後藤 1996, 大江・三本 1998, 2002, 渡邊ら 2006a) と概ね一致した。穂重型になれば一穂粒数も増えるが、同時に稈重や稈の太さ、葉面積等も増加する。この際、一穂粒数等のシンクサイズと葉面積等のソース能力のどちらの増加割合が大きいかにより、シンク-ソース比の増減は決定される。深水栽培では慣行栽培に比べて稈基部のデンプン含有率が高く (古谷ら 1991)、登熟期の葉色が高い (桐山・中谷 1987, 錦ら 1988, 古谷ら 1991) ことから、葉面積拡大や単位葉面積あたりの光合成速度の増加等によるソース能力の増加割合が上回っている可能性が高い。実際、深水栽培では、弱小な2次分げつの発生が少なく、強勢な下位1次分げつの穂が多い (第4図) ことに加えて、一穂粒数が増加しているに

もかわらず玄米千粒重が増加 (第2表) していることから、シンクサイズの増加効果よりもソース能力の増加効果の方が高く、初あたりのソース能力は向上していると推察される。ササニシキとコシヒカリでは、深水栽培を行うと、同程度の粒数でも白未熟粒の割合が減少しており (第8図)、この推察を支持する。初星では、深水処理によって粒数が減少して白未熟粒割合が低下していることから (第8図)、ソース能力の向上に粒数 (シンクサイズ) 減少の効果が加わり、初あたり炭水化物供給量がさらに大きくなったと考えられる。これが初星で深水栽培による白未熟粒減少の効果が特に顕著であった要因の1つと考えられる。以上のことから、深水栽培による白未熟粒の抑制は、ソース能力の増加により、初あたりの炭水化物供給量が高まることが一つの要因であり、品種や栽培条件によるシンクサイズの減少の効果が加わった場合には、さらに白未熟粒発生が抑制されると推察される。

深水区の収量は、供試全品種で慣行区と同程度であった (第2表)。林 (2007) はコシヒカリを不耕起V溝直播で生育初期から無落水深水栽培し、慣行栽培と遜色ない収量を確保し、米粒の外観品質が向上したことを報告している。また、佐藤ら (2002) はあきたこまちに7~9.5葉期の深水処理を行い、品質が低下せずに収量が17%増加したことを報告している。また、瀬尾ら (2007) は直播コシヒカリで深水栽培を行い、収量が $45\text{ kg}/10\text{ a}$ 増加し、青未熟粒割合が低下したことを報告している。これらの報告は、深水栽培が収量、品質を低下させることなく、そのどちらか一方、あるいは両方を向上させることが可能であることを示している。

収量の年次による推移をみると、慣行区と深水区では、概ね似た傾向を示したが、2007年は、深水区のみ収量が減少している年であった (第5図)。この年には、慣行区の収量は2004年や2006年に比べて高くなっており、生育条件は良好であったと考えられる。それにもかかわらず、深水区での2007年の収量は、初星では2006年より低下した。このように年次により深水処理が収量低下の要因となる可能性があるため、その原因を解析した。その第一の要因として、2007年には穂数が $220\text{ 本}/\text{m}^2$ 程度と試験を行った4年間で最も少なかったことがあげられる (第2表)。これに加えて、初星は、深水処理による一穂粒数の増加割合が小さいため、穂数の減少を補償できず、大きく減収したと考えられる。これに対して、コシヒカリでは、初星同様に穂数が少ないが、一穂粒数の増加割合が高いため2006年よりやや増収したと考えられる。茎数の推移をみると、2007年には、深水処理開始時の茎数は $220\text{ 本}/\text{m}^2$ 程度であり、処理中、処理後も茎数が増加しなかったため、穂数が少なかった (第2図)。2006年も深水処理開始時の茎数は $220\text{ 本}/\text{m}^2$ 程度であったが、深水処理直前から処理前半にかけての気温が高く、処理期間中に茎数が増加したために、最終茎数は $300\text{ 本}/\text{m}^2$ 程度になった。ただし、深

水処理中に茎数が増加した年は、4年の試験期間中に1年のみであり、安定した収量を得るためには処理前の茎数確保が重要と考えられる。深水処理開始時の茎数は、2004年は各品種330本/m²と2006年、2007年に比べて多く、2005年は440本/m²程度と更に多かったにもかかわらず、この2年も、収穫時までほとんど茎数の変化がなかった。そのため、深水区の有効茎歩合は、93.5~96.8%と過去の報告（錦ら1988、古谷ら1991、大江・三本2002）と比べても高い値を示し、無効化した分げつが著しく少なかった（第3図）。以上のことから、茎数は条件の良い年には増える場合もあるが、深水処理開始以降は増減が少なく、処理開始時の茎数がほぼそのまま有効茎数になると考えられる。このことは、深水処理の開始時期を変えることにより、穂数を制御できる可能性を示唆している。深水処理では、一穂粒数と玄米千粒重がともに増加するので（第2表）、有効茎数を330本/m²程度確保できれば、慣行区と同程度の収量が得られると考えられる。そのためには、330本/m²程度の茎数を確保してから深水処理を開始することが必要である。また、深水処理開始時の茎数が440本/m²程度だった2005年には、収量が大きく増加し、白未熟粒割合も減少した。このことから、生育中期の深水処理は、処理開始時の茎数にかかわらず白未熟粒の発生を抑制するが、慣行栽培と同程度の収量を得るには、処理開始時に330本/m²程度の茎数が必要であり、440本/m²程度確保できれば多収も期待できると考えられる。

以上のことから、深水栽培は水稻における収量の確保と米粒の外観品質向上に有望であり、登熟期の高温による品質低下を軽減することが可能な技術であると考えられる。しかし、深水栽培を行う上で湛水に十分な高さの畦畔が必要であり、利用可能な圃場は限られる。また、水利の問題から、深水栽培の導入が難しい地域もある。一方、水稻を深植すると、深水栽培と同様に分げつの発生が抑制され、有効茎歩合が高まることが知られている（船越1962、太田ら1969、伊藤ら1970、斎藤1994）。今後、深水栽培の適用が困難な場合の代替技術として深植について検討する必要がある。

謝辞：本研究のとりまとめにあたり、大阪府立大学の大江真道博士、中央農業総合研究センターの寺島一男博士、廣瀬竜郎博士、古畑昌巳博士および作物研究所の近藤始彦博士には、貴重なご意見とご指導を頂いた。また、中央農業総合研究センター業務第4科の福永孝二氏、小竹剛志氏、玄蕃徳也氏、栗崎利幸氏、小出賢一氏には圃場管理にご尽力頂いた。非常勤職員の杉浦尚美氏には生育調査にご協力頂いた。深く感謝申し上げます。また、統計処理は農林水産研究計算センターのSASを用いた。

引用文献

- 千葉雅大・松村修 2006. 風の遮断による圃場高温処理法. 日作紀 74 (別1): 228-229.
- 福島敏和・山口正篤・薄井雅夫・松永純子 1997. 水稻の栽植密度、植付本数と収量構成要素、玄米品質との関係. 日作関東支報 12: 38-39.
- 船越三郎 1962. 挿秧深度が水稻の生育・収量におよぼす影響. 日作紀 31: 69-72.
- 古谷勝司・桃木信幸・児嶋清 1991. 水稻における生育中期の水管理が生育・収量に及ぼす影響—深水管理を中心にして—. 北陸農試報 33: 29-53.
- 後藤雄佐 1996. 水稻の深水栽培とその貯水機能の活用. 農業技術 51: 344-348.
- 林元樹 2007. 水稻不耕起V溝直播栽培による深水無落水栽培. 農業技術体系 作物編 2 イネ基本技術②. 農文協, 東京. 506の80-506の86.
- 井上健一・林恒夫・湯浅佳織・笈田豊彦 2004. 水稻品質食味要因の安定性に関する解析的研究 第2報 疎植条件が水稻の物質生産と収量品質に及ぼす影響. 福井農試研報 41: 15-28.
- IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 1-996.
- 伊勢智宏・柏原一成・竹澤利和 1995. 水稻品種「かけはし」の育成・栄養診断基準と栽培法 第1報 栽培様式の違いと収量・品質. 東北農業研究 48: 47-48.
- 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.
- 伊藤俊一・三浦貞幸・高橋英一 1970. 水稻稚苗移植の植付深. 東北農業研究 11: 68-70.
- 岩下友記・新屋明・山川恵久・土井修・上原裕美・鳥山国土 1973. 水稻の高温登熟について—品質の変化と品種間差異—. 日作九支報 39: 48-57.
- 神田幸英・北野順一・山中聡子 1997. 水稻乳苗疎植栽培の生育と収量構成要素の特徴. 日作東海支会報 123: 11-12.
- 木村浩・森重陽子・杉本英治・住吉俊治・河内博文・川崎哲朗 2005. 疎植水稻の生育特性と安定生産技術. 愛媛農試研報 39: 1-9.
- 桐山隆・中谷始夫 1987. 深水管理と水稻後期の生育. 北陸作物学会報 22: 11-12.
- 近藤始彦 2007. コメの品質、食味向上のための窒素管理技術 [1]—水稻の高温登熟障害軽減のための栽培技術開発の現状と課題— 農及園 82: 31-34.
- 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.
- 松村修 2006. 高温登熟性を向上する. 農及園 81: 96-101.
- 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.
- 新潟県農林水産部 2005. 水稻栽培指針. 新潟県農林水産部編, 新潟. 48-49.
- 錦斗美夫・長谷川愿・芳賀静雄・神保恵志朗 1988. 水稻生育と深水管理. 農及園 63: 723-731.
- 農林水産省 2006. 水稻の高温障害の克服に向けて (高温障害対策レポート). <http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/kouon/report.pdf> (2008/5/14 閲覧).
- Nuruzzaman, M., Y. Yamamoto, T. Yoshida, Y. Nitta and A. Miyazaki 2000. Behavior of primary, secondary and tertiary tillers in two high tillering rice varieties, IR 36 and Suweon 258, under different planting densities. Jpn. J. Trop. Agr. 44: 94-106.
- 大橋善之・今井久遠 2004. 京都府丹後地域における水稻「コシヒカリ」の疎植栽培が収量、品質に及ぼす影響. 日作紀 73(別1): 26-27.

- 大江真道・三本弘乗 1998. 深水処理の時期および期間が日本型水稻の生長と倒伏抵抗性に及ぼす影響. 日作紀 67: 153-158.
- 大江真道・三本弘乗 2002. 水稻の生育制御を目的とした深水処理適期の検討. 日作紀 71: 335-342.
- 太田孝・杉山薫・板谷至 1969. 水稻栽培条件の許容度に関する研究 第8報 田植機栽培の植付深の許容度について. 日作東海支部研究梗概 54: 1-3.
- 斎藤幸一・深山政治 1988. 千葉県における稚苗移植による早期栽培水稻の安定多収に関する研究 第2報 乳白米発生程度の品種間差異について. 千葉農試研報 29: 1-8.
- 斎藤祐幸 1994. 水稻乳苗の移植深度と生育の関係. 北陸作物学会報 29: 62-63.
- 坂田雅正・高田聖 2006. 高知県における高温登熟による品質低下に対応する品種と技術開発. 農及園 81: 102-109.
- 佐藤孝・清水清隆 1958. 栽植密度が水稻の分けつ構成に及ぼす影響. 日作紀 27: 179-181.
- 佐藤馨・三浦恒子・金和裕・児玉徹 2002. 深水処理が水稻の収量向上に及ぼす要因. 東北農業研究 55: 45-46.
- 瀬尾和敬・鯨幸夫・西畑孝義・舘哲也・柴垣健太郎・梅本英之 2007. 直播水稻の中期深水管理が生育, 収量および品質に及ぼす影響. 北陸作物学会報 42: 47-50.
- 朱宮昭男・伊藤俊雄・坂紀邦・藤井潔・加藤恭宏・香村敏郎 1986. 水稻品種の特性解析に関する研究 (第6報) 青い空, 星の光, 月の光の米質. 愛知農総試研報 18: 13-25.
- 高橋渉 2006. 気候温暖化条件におけるコシヒカリの白未熟粒発生軽減技術. 農及園 81: 1012-1018.
- 寺島一男・齋藤祐幸・酒井長雄・渡部富男・緒方武文・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.
- 富山県農林水産部 2005. 平成17年度水稻・大豆・大麦栽培技術指針. 富山県農林水産部編, 富山, 23.
- 若松謙一・田之頭拓・小牧省三・東孝行 2005. 暖地における水稻登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響と品種間差異. 日作九支報. 71: 6-9.
- 渡邊肇・日高秀俊・三枝正彦・大江真道・渋谷暁 2006a. 中山間地の深水栽培における水稻の生育と収量. 日作紀 75: 257-263.
- 渡邊肇・日高秀俊・三枝正彦・大江真道・渋谷暁 2006b. 中山間地における苗箱全量施肥による水稻の不耕起移植深水栽培. 日作紀 75: 264-272.
- 山田千津子・福島淳・宮下武則・十川和士・山浦浩二 2003. 収量と品質の確保が可能な水稻「ヒノヒカリ」の疎植栽培法. 平成14年度近畿中国四国農業研究成果情報. 31-32.
- 山川智大・神田幸英 2003. 水稻高温耐性検定方法の改良と基準品種選定. 日作紀 72(別1): 100-101.

Improvement of Grain Quality and Yield by Deep-Flood Irrigation : Masahiro CHIBA^{1, 2)}, Osamu MATSUMURA¹⁾, Tomio TERAOKA¹⁾, Yoshihiko TAKAHASHI²⁾, Hajime WATANABE²⁾ (¹⁾Natl. Agric. Res. Center, Joetsu, 943-0193, Japan; ²⁾Grad. School of Sci. & Tech., Niigata Univ.)

Abstract : Minimizing the deterioration of grain quality caused by the high temperature stress in the ripening stage is an important agronomical issue in rice cultivation. Field trial was conducted to investigate the effects of deep-flood irrigation on the growth and quality of rice under high and normal ripening temperatures. The experiment was carried out from 2004 to 2007 using three rice cultivars (Hatsuboshi, Sasanishiki and Koshihikari). Two water management regimes were prepared: DFI (deep-flood irrigation; water level was kept in 18 cm from active tillering to maximum tiller stage) and CWI (conventional water irrigation). DFI decreased inferior tillers, resulting in a higher percentage of tillers that produce mature grains. Although DFI decreased the number of panicles, it increased the number of grains per panicle and thousand grain weight of brown rice; hence, the yield equal to that in the CWI plot. In addition, DFI markedly decreased the occurrence of milky white grains. This effect was observed both in high and normal temperature conditions, suggesting that DFI is an effective method to overcome the deterioration effect of a high ripening temperature. The higher sensitivity of the cultivar to a high temperature, the higher the DFI effect. However, DFI should be started after production of enough tillers. Otherwise, the yield will be decreased due to a shortage of tillers. Three hundred and thirty tillers/m² before the start of DFI may be needed to have the same level of yield as that by the conventional cultivation in addition to reducing deteriorated grains.

Key words : Chalky grain, Cultivar, Deep-flood irrigation, High temperature stress, Rice.