

深水栽培による高品質米生産技術 —深水処理の水深と期間および植付深が水稻の収量・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：近年の気候温暖化で水稻の登熟期間中の気温が上昇し、白未熟粒の多発による品質低下が問題となっている。深水栽培は白未熟粒の発生抑制に有効であるが、効果の大きい水深 18 cm の深水栽培が可能な圃場は限られる。そこで、高温登熟耐性が弱の初星と中程度のコシヒカリを用いて、慣行栽培と水深 18 cm の強深水栽培に加えて、深水栽培と同様に分げつ発生を抑制する深植（植付深 6 cm）と、比較的水深が浅い弱深水栽培（水深 10 cm）、および両者の組み合わせについて、水稻の生育と収量、品質に及ぼす影響を比較・検討した。その結果、初星では、深植した水稻に活着期から最高分げつ期にかけて水深 10 cm の深水栽培を行うと、白未熟粒の発生が減少し、水深 18 cm の深水栽培でみられた減収傾向はなく、収量が安定的に確保された。コシヒカリでは、水深 18 cm の深水栽培をしても、有意に収量は低下せず、この栽培条件で品質が最も高かった。また、コシヒカリでも、深植水稻の水深 10 cm の深水栽培では、有意な収量低下がなく、水深 18 cm の深水処理に次いで白未熟粒割合も低くなった。深水栽培により、土壌の酸化還元電位が低下したが、登熟期の根系の機能に悪影響はみられなかった。深水栽培により明確な地耐力の低下はみられなかったことから、収穫時の機械作業に支障をきたす可能性は低いと考えられた。

キーワード：イネ、白未熟粒、深植、深水栽培。

気候温暖化により、水稻の登熟気温が上昇し、白未熟粒の多発による米粒外観品質の低下が問題となっている（農林水産省水稻高温対策連絡会議対策推進チーム 2006）が、その対策として、深水栽培は有効であることが報告されている（林 2007, 千葉ら 2009）。分げつ盛期から最高分げつ期にかけて、水深 18 cm の深水栽培を行うと、茎数の増加が抑制され穂数が減少する反面、一穂粒数が多い穂重型の生育を示し、白未熟粒の発生が抑制される（千葉ら 2009）。深水栽培では、穂揃期の籾あたり葉鞘・稈の非構造化炭水化物（NSC）量と籾あたり葉身窒素含有量が増加し、登熟期間中の籾あたり葉面積の減少が少なく、シンクである籾に対するソース機能の向上が、深水栽培の白未熟粒発生の抑制に作用していることが示されている（千葉ら 2011）。

このように深水栽培は、白未熟粒の発生抑制に効果が大いだが、圃場によっては 18 cm の湛水が難しい場合がある。水田の圃場整備の基準では畦畔の高さは 30 cm である（農林水産省構造改善局資源部資源課 2000）ため、基盤整備が行われた圃場では、計算上は 18 cm の湛水が可能である。しかし、整備が行われていない圃場では畦畔が低い場合が多く、整備がなされていても、畦畔の崩壊や漏水、水口、用水路の構造等といった農業水利上の要因により、18 cm の湛水ができないことが考えられる。また、寒冷地の圃場整備では、冷害対策を目的とした深水栽培の導入を想定して畦畔の基準高が 40 cm に定められている。この基準で整備した圃場では、18 cm の湛水が可能と考えられる。しかし、高温登熟による品質低下（寺島 2001）が問題となっており、

かつ、冷害対策で深水栽培に対応した畦畔が整備されているのは、主に東北地方であり、他の高温による品質低下が問題となっている地域では、深水栽培を想定した圃場整備は行われていない。そのため、米粒の品質向上を目的とした深水栽培の広範な普及を目指すには、18 cm よりも浅い水深で同程度の効果が得られる栽培技術の開発が必要である。しかし、深水栽培では、処理水深が浅くなると、茎数抑制効果は低下する（長尾・岩野 1961, 林ら 2010）ため、白未熟粒の発生抑制効果も低下する可能性が高い。

一方、分げつの発生を抑制する他の方法として、移植苗の植付深を深くすることがあげられる（船越 1962, 太田ら 1969, 伊藤ら 1970）。したがって、本研究ではこの深植に着目し、18 cm よりも浅い湛水深での深水栽培において、茎数抑制効果の低下を、深植によって補うことができるのではないかと考えた。そこで、本試験では、収量の安定と米粒の品質向上をねらいとし、深植と水深 10 cm の比較的浅い深水処理を、単独もしくは併用処理して、湛水深と植付深の差異が収量と品質に及ぼす影響を比較・検討した。

比較的水深が浅い深水処理で十分な茎数抑制効果を得るには、処理期間の延長が有効と考えられるが、深水処理の長期化により収穫期の地耐力が低下し、収穫作業に支障をきたすことが懸念される。また、処理期間が長くなると、土壌の還元化が進行し、根系への悪影響も懸念される。そこで、深水処理の期間が土壌環境や水稻の根系の機能に及ぼす影響を調べるために、深植水稻について 10 cm の深水処理の期間を変えて、収量と品質を調査するとともに、土

壤の酸化還元電位の推移と登熟期における茎葉からの出液速度を測定した。また、地耐力の指標として、収穫期における土壌の貫入抵抗への影響を、深水处理の水深と処理期間

間を変えて比較・検討した。

材料と方法

1. 栽培管理の概要

水稻 (*Oryza sativa* L.) 品種の初星およびコシヒカリを供試した。高温登熟耐性は初星が弱く、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)。試験は、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 (細粒強グライ土) で 2008 年と 2009 年に行った。2008 年は 5 月 20 日, 2009 年は 5 月 21 日に中苗を栽植密度 22.2 株 / m^2 , 1 株 3 本で手植し, 基肥として化成肥料 (N, P_2O_5 , K_2O を各 15% 含有) を各成分で 0.3 kg/a, 穂肥として硫酸を窒素成分で 0.2 kg/a を施用した。

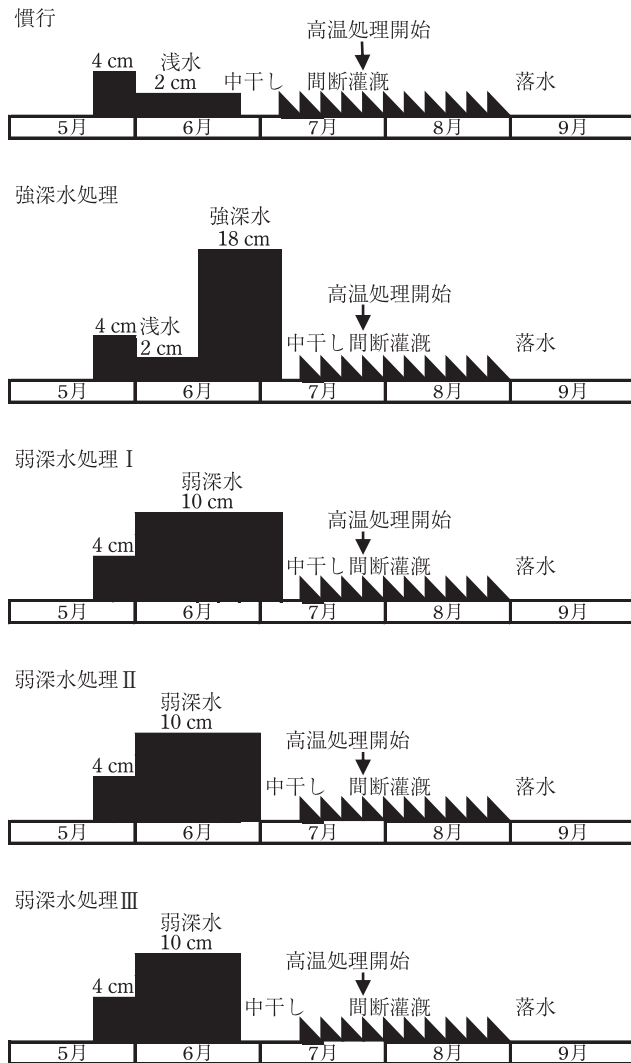
2. 試験区の植付深および水管理 (深水处理の時期と水深)

植付深は、慣行 (3 cm) と深植 (6 cm) の 2 水準とした。第 1 図に水管理の模式図を示した。水管理によって、慣行、強深水处理 (水深 18 cm), 弱深水处理 (水深 10 cm) の 3 水準とした。強深水处理は、分けつ盛期から最高分けつ期に処理した。弱深水处理は活着期から最高分けつ期の処理を弱深水处理 I, これよりも処理期間を 1 週間短くした弱深水处理 II, 更に 1 週間短縮した弱深水处理 III とした。

2008 年は、慣行区、強深水区、深植区、弱深水 I 区、深植弱深水 I 区の 5 試験区とした (第 1 表)。2009 年は、2008 年の結果をもとに、慣行区、強深水区、深植区、弱深水 I 区、深植弱深水 I 区に加え、弱深水处理の期間が短縮できるかどうか検証するために深植弱深水 II 区、深植弱深水 III 区を設けた。両年とも 2 反復で試験を行った。

3. 高温処理

深植および深水等の栽培管理が、登熟期の高温による白未熟粒発生を抑制する効果を評価するために、出穂直前から成熟期まで、各試験区内に 1 箇所、縦 1.8 m × 横 1.8



第 1 図 水管理の模式図.

第 1 表 試験区の設計.

年次	試験区	植付深	水管理
2008	慣行区	慣行 (3 cm)	慣行
	強深水区	慣行 (3 cm)	強深水处理 (6/23~7/11, 水深 18 cm)
	深植区	深植 (6 cm)	慣行
	弱深水 I 区	慣行 (3 cm)	弱深水处理 I (6/3~7/11, 水深 10 cm)
	深植弱深水 I 区	深植 (6 cm)	弱深水处理 I (6/3~7/11, 水深 10 cm)
2009	慣行区	慣行 (3 cm)	慣行
	強深水区	慣行 (3 cm)	強深水处理 (6/21~7/8, 水深 18 cm)
	深植区	深植 (6 cm)	慣行
	弱深水 I 区	慣行 (3 cm)	弱深水处理 I (6/1~7/8, 水深 10 cm)
	深植弱深水 I 区	深植 (6 cm)	弱深水处理 I (6/1~7/8, 水深 10 cm)
	深植弱深水 II 区	深植 (6 cm)	弱深水处理 II (6/1~7/1, 水深 10 cm)
	深植弱深水 III 区	深植 (6 cm)	弱深水处理 III (6/1~6/24, 水深 10 cm)

第2表 苗の特性と植付深.

品種	年次	葉齢	苗丈 (cm)	植付深 (cm)		地上部苗丈 (cm)	
				慣行	深植	慣行	深植
初星	2008	4.3 ± 0.0	15.9 ± 0.3	3.2 ± 0.1	6.3 ± 0.2	12.7	9.6
	2009	4.4 ± 0.0	16.9 ± 0.1	3.3 ± 0.1	6.1 ± 0.1	13.6	10.8
	平均	4.4	16.4	3.3	6.2	13.1	10.2
コシヒカリ	2008	4.0 ± 0.0	16.2 ± 0.2	3.4 ± 0.1	6.6 ± 0.2	12.8	9.6
	2009	4.2 ± 0.0	17.1 ± 0.1	3.6 ± 0.1	6.2 ± 0.1	13.5	11.0
	平均	4.1	16.7	3.5	6.4	13.2	10.3

地上部苗丈は苗丈と植付深の差から計算. ± は標準誤差を示す.

m の区画を高さ 1.5 m の防霧農業用ビニール (厚さ 0.1 mm, ノービエスみらい, MKV プラスチック) で囲ったオーブントップチャンバーを設け, 高温処理区とし (千葉・松村 2006), それ以外を非高温処理区とした. この方法は, 上面が空いているために, 遮光の影響が少なく, 昼温が 0.5℃ 程度上昇する (千葉ら 2009). 下から上への空気の流れを遮断しないよう, 地面からビニールの裾までは 3 cm の隙間を空けた. 高温処理区の株は, 白未熟粒の調査にのみ用い, 収量調査や食味官能試験は, 非高温処理区の株を用いた.

4. 苗質と植付深, および茎数の評価

移植日に各品種 100 個体について苗の葉齢と苗丈を測定し, 移植翌日に慣行区と深植区の移植した苗を抜き取り, 各区 40 株について実際の植付深を測定した. また, 深水処理や深植の茎数抑制効果を調べるため, 反復あたり 12 株について, 茎数の推移を調査した.

5. 収量, 米粒外観品質調査および食味官能試験

反復ごとに高温処理区と非高温処理区について, それぞれ 12 株収穫し, 収穫後に粒厚 1.8 mm 以上の玄米について, 穀粒判別機 (ES-1000, 静岡精機) で, 外観品質を調査し, 乳白粒, 腹白粒, 基部未熟粒に分類された米粒の合計を白未熟粒とした. また, 反復ごとに非高温処理区の 20 株をサンプリングして, 脱粒, 粳摺り後に 1.8 mm の縦目篩で選別し, 収量と収量構成要素を調査した.

2009 年産の非高温処理区のコシヒカリについて, 中央農業総合研究センター低コスト稲育種研究北陸サブチームの方法 (Terao ら 2005, 重宗ら 2007) に従って, 食味官能試験を行った. 評価項目は, 総合値, 外観, 香り, うまみ, なめらかさ, 粘り, 硬さの 7 項目であった. 基準品種として日本晴を評価値 0, コシヒカリを評価値 +2, トヨニシキを評価値 -2 とし, +5 ~ -5 の範囲で評価した. これらの基準品種は, 慣行に従って栽培したものを, 低コスト稲育種研究北陸サブチームから提供を受けた. パネラーは 22 名で, そのほとんどは複数年の食味官能試験の経験がある熟練者であった.

6. 酸化還元電位, 登熟期の出液速度および収穫期の貫入抵抗値

深水処理が土壌の酸化還元電位に及ぼす影響を調べるために, 2009 年に水管理ごとに白金電極 6 本を地下 5 cm に挿し, 土壌の酸化還元電位の推移を測定した. ただし, 中干し期間は水膜が切れるため, 酸化還元電位は測定できなかった. 強深水管理では処理期間中, 電極が完全に水没するため, 処理後に電極を設置し酸化還元電位を測定した. また, 深水処理が根の吸収活性に及ぼす影響を調べるために, 穂揃期と登熟中期に, 森田・阿部 (1999) の方法によって, 茎葉からの出液速度の測定を行った. 測定は, 慣行区に加えて, 処理水深の影響をみるために水深の最も深い強深水区, および弱深水の処理期間の影響を見るために, 処理期間の最も長い深植弱深水 I 区で行った. 午前中に, 地際から 15 cm の高さで水稻の茎葉部を切断し, 事前に重量を測定しておいた脱脂綿を断面に当てて, ラップを被せて輪ゴムでとめた. 1 時間後に脱脂綿を回収し, 増加重を 1 株につき 1 時間あたりの出液速度とした.

深水処理の処理水深および処理期間が, 収穫期の地耐力に及ぼす影響を調べるために, 水管理ごとに, 収穫期に貫入式土壌硬度計 (DIK5521, 大起理化工業, コーン頂角 30°, 底面積 2 cm²) を用いて, 地下 15 cm までの平均土壌貫入抵抗値を測定した.

結 果

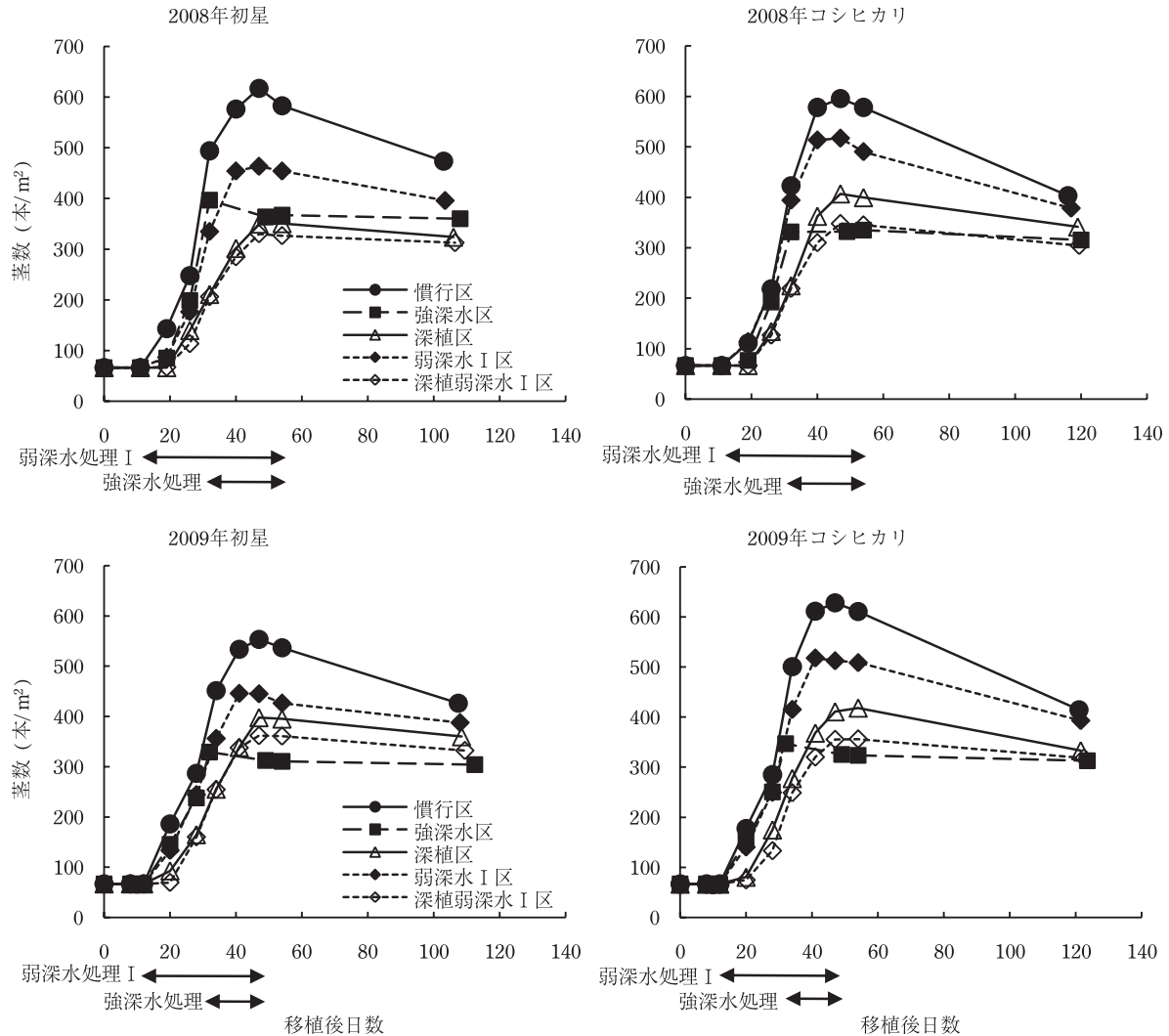
1. 苗の特性と植付深

第 2 表に移植した苗の特性と実際の植付深を示した. 移植した苗は葉齢 4.0 ~ 4.4, 苗丈 15.9 ~ 17.1 cm の中苗であった. 植付深は, 慣行区が目標の 3 cm に対して 3.2 ~ 3.6 cm, 深植区が目標の 6 cm に対して 6.1 ~ 6.6 cm であり, 概ね設計通りに移植することができた. その結果, 苗丈と植付深の差は慣行区で 12.7 ~ 13.6 cm, 深植区で 9.6 ~ 11.0 cm となり, 深植しても移植直後に苗が水没することはなかった.

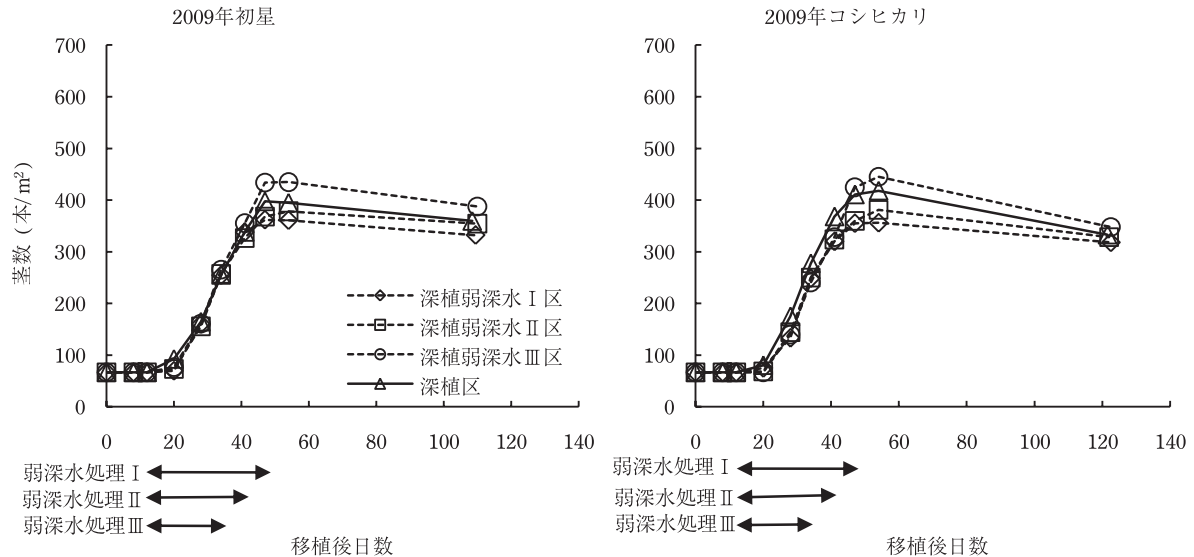
2. 茎数の推移

第 2 図 A に植付深および深水処理水深が茎数の推移に及ぼす影響を示した. 分けつのない苗を 22.2 株 / m² で 3 本

A. 植付深および深水处理水深が茎数の推移に及ぼす影響.



B. 深水处理期間が茎数の推移に及ぼす影響.



第2図 植付深と水管理が茎数の推移に及ぼす影響.

図下部の矢印は深水处理期間を示す. コシヒカリの凡例は左図の初星と同一.

A. 植付深および深水处理水深が茎数の推移に及ぼす影響.

B. 深水处理期間が茎数の推移に及ぼす影響.

第3表 栽培管理が収量に及ぼす影響。

品種	試験区	精玄米収量 (kg/10 a)		
		2008 年	2009 年	平均
初星	慣行区	668 a \pm 27	523 a \pm 14	595 a
	強深水区	557 a \pm 7	528 a \pm 7	543 a(91.2)
	深植区	659 a \pm 34	542 a \pm 23	601 a(100.9)
	弱深水 I 区	611 a \pm 17	563 a \pm 14	587 a(98.6)
	深植弱深水 I 区	612 a \pm 41	559 a \pm 12	585 a(98.3)
	深植弱深水 II 区	—	559 a \pm 26	—
	深植弱深水 III 区	—	536 a \pm 33	—
コシヒカリ	慣行区	644 ab \pm 16	548 a \pm 22	596 a
	強深水区	680 a \pm 13	525 a \pm 10	602 a(101.2)
	深植区	630 ab \pm 8	576 a \pm 46	603 a(101.3)
	弱深水 I 区	605 b \pm 11	573 a \pm 10	589 a(99.0)
	深植弱深水 I 区	630 ab \pm 15	557 a \pm 0	594 a(99.7)
	深植弱深水 II 区	—	524 a \pm 16	—
	深植弱深水 III 区	—	564 a \pm 22	—
有意差	栽培管理	ns	ns	ns
	品種	ns	ns	ns
	年次	—	—	***
	栽培管理 \times 品種	*	*	ns

± は標準誤差，カッコ内は平均値の慣行区比 (%) を示す。

下段は分散分析の結果を示す。*, *** はそれぞれ 5%, 0.1% 水準で有意差あり。ns は有意差なし。栽培管理と年次との間、品種と年次との間では、交互作用は有意ではなかった。

異なる記号は、同じ品種、年次 (年次平均) 内において、Tukey の多重比較で、5% 水準の有意差あり。

植したため、移植時の茎数は 66.6 本 /m² であった。強深水区では、慣行区に比べて、初星、コシヒカリともに、両年で深水处理開始から顕著に茎数増加が抑制されて、処理後も茎数の増減がなく、ほとんどの分けつが有効化し、有効茎歩合は高かった。これは、深水处理により分けつ発生が抑制されて、有効茎歩合が高まった前報 (千葉ら 2009) の結果と一致した。これに対して、処理水深を浅くして、処理期間を延ばした弱深水 I 区でも茎数増加が抑えられたが、その効果は、強深水区よりも小さかった。深植区でも茎数抑制効果がみられ、2008 年の初星では強深水区より効果が大きくなったが、その他の品種と年次では強深水区よりやや効果が小さかった。深植と弱深水処理 I を組み合わせた深植弱深水 I 区についてみると、初星では、茎数抑制効果は深植区とほとんど変わらなかったが、コシヒカリでは、弱深水 I 区および深植区に比べて茎数の増加が抑制された。

2009 年は、深植水稻の弱深水処理を、深水处理の終了時期を変えて行った (第 2 図 B)。その結果、深水处理の処理終了時期が早いほど、茎数抑制効果が減少した。最も処理期間が短い深植弱深水 III 区では、弱深水処理終了後に他区よりも茎数が増加し、深水处理を行っていない深植区より最高茎数が多くなった。

3. 収量と収量構成要素

第 3 表に精玄米収量を示した。品種および区を込みにし

た収量は、2008 年が 2009 年より有意に高かった。2008 年は、慣行区の収量が、初星で 668 kg/10 a、コシヒカリで 644 kg/10a となり、本試験と同一圃場、同一条件で栽培した 2004 年から 2007 年の平均値 (初星 485 kg/10 a、コシヒカリ 497 kg/10 a、千葉ら 2009) を大きく上回る多収年であった。また、栽培管理と年次との間で交互作用はなく、栽培管理の影響が年次により異なる傾向は明らかでなかった。

次に、品種別に各処理の影響をみると、初星では 2008 年の強深水区で慣行区に比べて 100 kg/10 a 以上、収量が低下したが、この差は有意ではなかった。深植区、弱深水 I 区および深植弱深水 I 区では、強深水区でみられた収量低下はなかった。これに対して、コシヒカリでは、2009 年には処理間に有意差はみられなかった。2008 年には、強深水区で弱深水 I 区に比べて有意に増加したが、その他の区と慣行区の間には有意差はみられなかった。

処理別に収量の傾向をみると、まず、初星の強深水区では、慣行区に比べて、2008 年には大きな減少傾向がみられ、2009 年には逆にやや増加傾向がみられたが、どちらも有意ではなかった。2 年間の平均では 8.8% 減少したが、この差も有意ではなかった。これに対し、コシヒカリの強深水区では、2008 年には増加し、2009 年には減少し、初星とは逆の年次変動を示した。この強深水処理による収量への影響は有意ではなく、2 年間の平均では、強深水区の収量は慣行区と同等となった。

第4表 深水処理水深が収量構成要素に及ぼす影響.

品種	年次	試験区	穂数	一穂粒数	登熟歩合	玄米千粒重	総粒数
			(本 /m ²)	(粒)	(%)	(g)	(100 粒 /m ²)
初星	2008	慣行区	481	66.5 a	93.1	22.4	320
		弱深水Ⅰ区	410 (85.3)	70.0 a (105.1)	94.5 (101.5)	22.6 (100.6)	287 (89.7)
		強深水区	355 (73.9)	68.4 a (102.8)	97.4 (104.6)	23.6 (105.2)	243 (75.9)
	2009	慣行区	369	67.4 a	90.6	23.2	249
		弱深水Ⅰ区	365 (98.8)	73.2 a (108.6)	91.5 (101.0)	23.1 (99.5)	267 (107.3)
		強深水区	301 (81.6)	78.6 a (116.6)	95.2 (105.1)	23.6 (101.5)	236 (94.7)
	平均	慣行区	425 a	67.0	91.9 a	22.8 a	284 a
		弱深水Ⅰ区	387 a (91.2)	71.6 (106.9)	93.0 a (101.2)	22.8 a (100.0)	277 a (97.4)
		強深水区	328 b (77.2)	73.5 (109.8)	96.3 a (104.8)	23.6 a (103.3)	239 a (84.1)
	コシヒカリ	2008	慣行区	411	79.7 a	89.6	22.0
弱深水Ⅰ区			386 (94.0)	80.6 a (101.2)	87.6 (97.8)	22.0 (100.0)	311 (95.7)
強深水区			378 (92.0)	84.1 a (105.5)	93.1 (104.0)	23.0 (103.8)	318 (97.6)
2009		慣行区	356	83.2 c	85.0	21.8	296
		弱深水Ⅰ区	341 (95.9)	89.9 b (108.1)	84.6 (99.6)	22.1 (101.4)	307 (103.6)
		強深水区	262 (73.6)	97.7 a (117.4)	91.1 (107.1)	22.5 (103.5)	256 (86.4)
平均		慣行区	383 a	81.4	87.3 a	22.0 b	311 a
		弱深水Ⅰ区	364 a (94.9)	85.3 (104.7)	86.1 a (98.7)	22.1 b (100.7)	309 a (99.4)
		強深水区	320 a (83.5)	90.9 (111.6)	92.1 a (105.5)	22.8 a (103.6)	287 a (92.3)
有意差	処理水深	***	**	**	**	**	
	品種	ns	***	***	***	***	
	年次	***	***	*	ns	**	
	処理水深×品種	ns	ns	ns	ns	ns	
	処理水深×年次	ns	*	ns	ns	ns	
	品種×年次	ns	ns	ns	ns	ns	

カッコ内は慣行区比(%)を示す.

下段は分散分析の結果を示す. *, **, *** はそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意差あり. nsは有意差なし.

処理水深と年次との間で交互作用が有意であった一穂粒数では年次ごとに、他の項目では年次平均で Tukey の多重比較を行った. 異なる記号は、同じ品種、年次(年次平均)内において、Tukey の多重比較で、5%水準の有意差あり.

収量調査株は茎数調査株(第2図)とは異なる(茎数調査株を含まない).

深植区についてみると、初星では、2008年は強深水区でみられたような大きな収量低下はみられず、2009年は慣行区に比べてやや増加し、平均では慣行区と同等であった. コシヒカリでも、2008年はやや減少、2009年はやや増加し、年次平均では慣行区と同等であった.

弱深水Ⅰ区、深植弱深水Ⅰ区の収量は、慣行区に比べて、2008年にやや減少する傾向がみられたが、2009年は両品種で増加傾向にあった. 2年間を平均すると、慣行区と同等の収量が得られた. 深植で、弱深水処理の処理期間を変えた深植弱深水Ⅱ区、Ⅲ区は2009年のみの試験であったが、コシヒカリの深植弱深水Ⅱ区でわずかに減少した以外は、慣行区に比べて増加する傾向を示した.

第4表に、深水処理の処理水深が両品種の2年間の収量構成要素に及ぼす影響を示した. その結果、測定した全ての収量構成要素で処理水深により有意差がみられた. また、処理水深と年次との間の交互作用は一穂粒数のみ有意であったため、一穂粒数のみ年次別に多重比較を行い、他は

年次平均で多重比較を行った. 穂数は、強深水区で慣行区に比べて減少した. その減少率は年次平均で初星22.8%、コシヒカリ16.5%であり、初星で慣行区との間に有意差が認められた. また、弱深水Ⅰ区では慣行区に比べて、穂数が年次平均で初星8.8%、コシヒカリ5.1%減少したが、有意差はなかった. 一穂粒数は、両品種共に深水処理により増加する傾向がみられた. しかし、一穂粒数については、処理水深と年次との間で交互作用が有意となり、深水にしたときの一穂粒数の増加効果が年次により異なった. 慣行区に対する増加割合は、2008年には強深水区では、初星で2.8%、コシヒカリで5.5%であったが、2009年の強深水区では、初星で16.6%、またコシヒカリで17.4%と大きく増加し、コシヒカリの2009年には有意差が認められた. 総粒数に対する処理水深の影響は、品種を込みにした分散分析では有意であったが、品種別に多重比較を行うと有意差はみられなかった. 有意差はないものの、強深水区の総粒数の年次平均は、慣行区に比べて、初星で15.9%、コ

第5表 植付深と深水処理が収量構成要素に及ぼす影響.

品種	年次	試験区	穂数 (本 / m ²)	一穂粒数 (粒)	登熟歩合 (%)	玄米千粒重 (g)	総粒数 (100 粒 / m ²)
初星	2008	慣行区	481	66.5	93.1	22.4	320
		深植区	430 (89.5)	75.3 (113.2)	91.9 (98.7)	22.2 (98.9)	324 (101.3)
		弱深水 I 区	410 (85.3)	70.0 (105.1)	94.5 (101.5)	22.6 (100.6)	287 (89.7)
		深植弱深水 I 区	380 (79.1)	75.5 (113.4)	94.8 (101.8)	22.6 (100.9)	286 (89.5)
	2009	慣行区	369	67.4	90.6	23.2	249
		深植区	360 (97.4)	71.8 (106.6)	91.6 (101.1)	22.9 (98.7)	258 (103.9)
		弱深水 I 区	365 (98.8)	73.2 (108.6)	91.5 (101.0)	23.1 (99.5)	267 (107.3)
		深植弱深水 I 区	315 (85.4)	87.5 (129.9)	88.0 (97.2)	23.3 (100.4)	278 (111.9)
	平均	慣行区	425	67.0	91.9	22.8	284
		深植区	395 (92.9)	73.6 (109.9)	91.7 (99.9)	22.5 (98.8)	291 (102.4)
		弱深水 I 区	387 (91.2)	71.6 (106.9)	93.0 (101.2)	22.8 (100.0)	277 (97.4)
		深植弱深水 I 区	348 (81.8)	81.5 (121.7)	91.4 (99.6)	23.0 (100.6)	282 (99.3)
コシヒカリ	2008	慣行区	411	79.7	89.6	22.2	325
		深植区	389 (94.9)	88.8 (111.4)	83.3 (93.0)	22.0 (99.2)	345 (106.1)
		弱深水 I 区	386 (94.0)	80.6 (101.2)	87.6 (97.8)	22.2 (100.0)	311 (95.7)
		深植弱深水 I 区	355 (86.5)	93.2 (116.9)	85.4 (95.3)	22.4 (101.2)	330 (101.3)
	2009	慣行区	356	83.2	85.0	21.8	296
		深植区	317 (89.2)	91.3 (109.6)	88.3 (103.9)	22.5 (103.1)	290 (97.8)
		弱深水 I 区	341 (95.9)	89.9 (108.1)	84.6 (99.6)	22.1 (101.4)	307 (103.6)
		深植弱深水 I 区	282 (79.3)	101.3 (121.7)	87.6 (103.1)	22.3 (102.2)	285 (96.3)
	平均	慣行区	383	81.4	87.3	22.0	311
		深植区	353 (92.2)	90.0 (110.5)	85.8 (98.3)	22.2 (101.1)	317 (102.1)
		弱深水 I 区	364 (94.9)	85.3 (104.7)	86.1 (98.7)	22.1 (100.7)	309 (99.4)
		深植弱深水 I 区	319 (83.1)	97.2 (119.4)	86.5 (99.1)	22.4 (101.7)	307 (98.9)
有意差		植付深	*	***	ns	ns	ns
		水管理	*	***	ns	ns	ns
		品種	*	***	**	***	**
		年次	***	**	ns	*	*
		植付深×年次	ns	*	ns	ns	ns
		品種×年次	ns	ns	ns	*	ns

カッコ内は慣行区比 (%) を示す.

下段は分散分析の結果を示す. *, **, *** はそれぞれ 5%, 1%, 0.1% 水準で有意差あり. ns は有意差なし.

植付深と水管理との間, 植付深と品種との間, 水管理と品種との間および水管理と年次との間には, 交互作用が有意な収量構成要素はなかった.

シヒカリ 7.7% 減少した. しかし, 弱深水 I 区では, 総粒数の年次平均は慣行区と差がなかった. また, 強深水区の登熟歩合の年次平均は, 慣行区に比べて, 初星で 4.8%, コシヒカリで 5.5% 増加したが, 有意差はなかった. 強深水区の玄米千粒重の年次平均は, 慣行区に比べて, 初星で 3.3%, コシヒカリで 3.6% 増加し, コシヒカリで有意差が認められた. 弱深水 I 区では, 2008 年のコシヒカリで若干登熟歩合が低下したが, 概ね慣行区と同等の登熟歩合であった. 弱深水 I 区の玄米千粒重は慣行区と同等であった.

第 5 表に, 植付深と水管理 (慣行と弱深水処理 I) が 2 年間の収量構成要素に及ぼす影響を示した. 植付深および水深が増加すると, 穂数が減少し, 一穂粒数は増加した. 両形質ともに, 植付深と水管理との間で交互作用はなく,

深植弱深水 I 区では, 深植と弱深水処理 I が相加的に穂数の減少と一穂粒数の増加に作用した. この相加的な増加のため, 深植弱深水 I 区の一穂粒数は, 強深水区 (第 4 表) を上回った. また, どの処理も品種との間で交互作用はなく, 両品種で同様な効果がみられたが, 一穂粒数の植付深と年次との間では交互作用が認められた. そこで, 年次別に深植区の一穂粒数を慣行区と比べると, 2008 年には, 初星で 13.2%, コシヒカリで 11.4% 増加したが, 2009 年には, 初星で 6.6%, コシヒカリで 9.6% 増加し, 2008 年の増加率の方が高かった. これは, 弱深水 I 区では 2008 年の増加率が低く, 2009 年の増加率が高かったのと逆であった. 登熟歩合および玄米千粒重, 総粒数に対しては, 植付深と水管理による有意な影響は認められなかった.

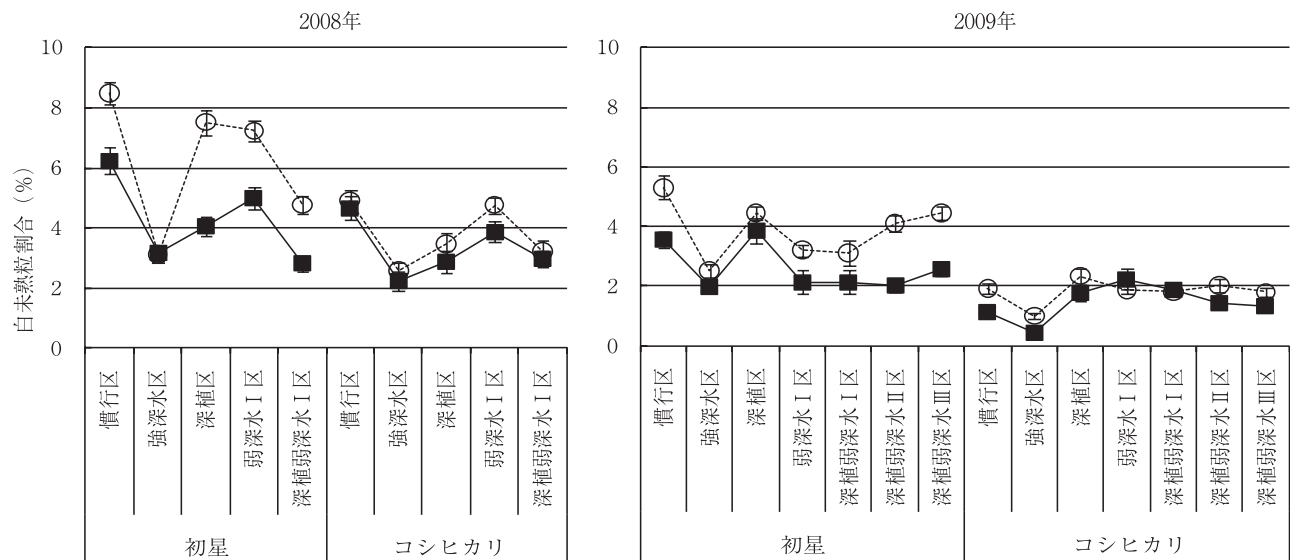
第6表 深水处理期間が収量構成要素に及ぼす影響.

品種	試験区	穂数 (本 /m ²)	一穂粒数 (粒)	登熟歩合 (%)	玄米千粒重 (g)	総粒数 (100粒 /m ²)
初星	慣行区	369 a (102.7)	67.4 a (93.8)	90.6 a (98.9)	23.2 a (101.3)	249 a (96.3)
	深植区	360 a	71.8 a	91.6 a	22.9 a	258 a
	深植弱深水Ⅰ区	315 a (87.7)	87.5 a (121.9)	88.0 a (96.1)	23.3 a (101.7)	278 a (107.7)
	深植弱深水Ⅱ区	338 a (93.8)	75.8 a (105.6)	93.1 a (101.7)	23.5 a (102.7)	256 a (99.0)
	深植弱深水Ⅲ区	361 a (100.3)	66.4 a (92.4)	95.1 a (103.9)	23.6 a (102.9)	239 a (92.4)
コシヒカリ	慣行区	356 a (112.1)	83.2 c (91.2)	85.0 a (96.2)	21.8 b (97.0)	296 a (102.2)
	深植区	317 a	91.3 cd	88.3 a	22.5 ab	290 a
	深植弱深水Ⅰ区	282 a (88.9)	101.3 a (111.0)	87.6 a (99.2)	22.3 ab (99.2)	285 a (98.4)
	深植弱深水Ⅱ区	284 a (89.3)	98.2 ab (107.6)	83.2 a (94.2)	22.6 a (100.7)	278 a (96.1)
	深植弱深水Ⅲ区	339 a (106.8)	87.4 c (95.7)	84.5 a (95.7)	22.5 ab (100.3)	296 a (102.2)
有意差	処理期間	ns	*	ns	ns	ns
	品種	*	**	*	*	ns
	処理期間×品種	ns	ns	ns	ns	ns

数値は2009年, カッコ内は深植区比(%)を示す.

下段は慣行区を除く分散分析の結果を示す. *, ** はそれぞれ5%, 1%水準で有意差あり. nsは有意差なし.

異なる記号はTukeyの多重比較で, 5%水準の有意差あり.



第3図 栽培管理が白未熟割合に及ぼす影響.

■: 非高温処理区, ○: 高温処理区. 縦棒は標準誤差.

第6表に, 深植水稻の弱深水处理期間の長さが収量構成要素に及ぼす影響を示した. なお, この場合には, 深植水稻の弱深水期間を比較しているため, 慣行区ではなく深植区を基準として比較を行った. 穂数については, 弱深水处理の期間が長くなるほど, 減少する傾向がみられたが, この差は有意ではなかった. 一穂粒数は, 逆に弱深水处理の期間が長くなるほど, 増加する傾向がみられ, コシヒカリでは有意であった. コシヒカリの一穂粒数では, 深植弱深水Ⅰ区とⅢ区の間, および深植弱深水Ⅱ区とⅢ区の間で有意差が認められた. 登熟歩合, 玄米千粒重, 総粒数には深水处理期間による有意差は認められなかった.

4. 白未熟粒割合と食味官能試験

第3図に栽培管理が品種の白未熟粒割合に及ぼす影響を示した. 強深水区では, 両品種で2年とも白未熟粒の発生が顕著に抑制された. ただし, 2009年のコシヒカリは, 慣行区でも白未熟粒の発生が少なく, その差は僅少であった. 深植区では, 2008年のコシヒカリの非高温処理区と高温処理区, および2008年の初星非高温処理区でやや減少したが, 2008年の初星高温処理区と2009年には効果が認められなかった. また, 弱深水Ⅰ区では効果が小さかった. しかし, 慣行区でも白未熟粒の発生が少なかった2009年のコシヒカリを除くと, 深植と弱深水処理Ⅰを組み合わせた

第7表 栽培管理が2009年産コシヒカリの食味に及ぼす影響.

試験区	総合	外観	香り	うま味	なめらかさ	粘り	硬さ
慣行区	1.00	0.91	0.29	0.82	0.73	1.00	-0.64
深植区	0.86 ns	0.64 ns	0.27 ns	0.77 ns	0.86 ns	0.77 ns	0.05 *
弱深水I区	0.86 ns	0.59 ns	0.18 ns	0.50 ns	0.45 ns	0.68 ns	-0.09 ns
強深水区	0.82 ns	0.68 ns	0.23 ns	0.59 ns	0.68 ns	0.68 ns	-0.32 ns
深植弱深水I区	0.76 ns	0.90 ns	0.20 ns	0.62 ns	0.52 ns	0.76 ns	-0.19 ns
深植弱深水II区	0.59 ns	0.64 ns	0.23 ns	0.43 ns	0.64 ns	0.59 ns	-0.36 ns
深植弱深水III区	1.09 ns	0.86 ns	0.10 ns	0.73 ns	0.68 ns	0.82 ns	-0.36 ns

各項目は、基準品種日本晴を0としたときの値を示す.

* は慣行区との間で5%水準で有意差あり. ns は慣行区との間で有意差なし.

第8表 試験区別の出穂期および出穂後20日間の平均気温.

品種	試験区	2008年			2009年			平均	
		出穂期	昼温 (°C)	慣行区との差 (°C)	出穂期	気温 (°C)	慣行区との差 (°C)	気温 (°C)	慣行区との差 (°C)
初星	慣行区	7月29日	26.2		8月1日	25.0		25.6	
	強深水区	8月3日	25.6	-0.5	8月5日	25.1	0.0	25.4	-0.2
	深植区	8月1日	26.1	0.0	8月2日	25.2	0.2	25.7	0.1
	弱深水I区	7月30日	26.1	0.0	8月1日	25.0	0.0	25.6	0.0
	深植弱深水I区	8月2日	25.9	-0.3	8月3日	25.2	0.2	25.5	-0.1
	深植弱深水II区	—	—	—	8月3日	25.2	0.2	—	—
	深植弱深水III区	—	—	—	8月3日	25.2	0.2	—	—
コシヒカリ	慣行区	8月6日	25.1		8月9日	24.9		25.0	
	強深水区	8月10日	24.9	-0.2	8月12日	24.5	-0.4	24.7	-0.3
	深植区	8月9日	24.9	-0.1	8月9日	24.9	0.0	24.9	-0.1
	弱深水I区	8月7日	24.9	-0.1	8月9日	24.9	0.0	24.9	-0.1
	深植弱深水I区	8月9日	24.9	-0.1	8月10日	24.8	-0.1	24.8	-0.1
	深植弱深水II区	—	—	—	8月11日	24.6	-0.2	—	—
	深植弱深水III区	—	—	—	8月10日	24.8	-0.1	—	—

気温は北陸研究センター露場での測定値.

深植弱深水I区では、相加的に白未熟粒の発生が抑制された. この傾向は特に初星の非高温処理区で著しく、強深水区と同等の白未熟粒抑制効果が得られた. また、深水処理期間が短い2009年の深植弱深水II区、III区でも、初星の非高温処理区では、白未熟粒割合が2%程度に低下しており、処理期間に関わらず弱深水処理による白未熟粒抑制効果が得られた. しかし、同じ2009年の初星でも高温処理区では、弱深水II区、III区の白未熟粒発生抑制効果は減少し、処理期間が長い弱深水区I区と深植弱深水I区に及ばなかった. また、コシヒカリでは、非高温処理区と高温処理区のいずれでも、2009年の慣行区の白未熟粒割合が低く、深植弱深水II区、III区の白未熟粒発生に対する効果はみられなかった.

第7表に、2009年産コシヒカリの食味官能試験の結果を示した. 総合値では、慣行区と他の区間に有意差は認められなかった. 個別の項目では、硬さにおいて、深植区で慣行区に比べて有意に増加したが、他の項目では有意差が

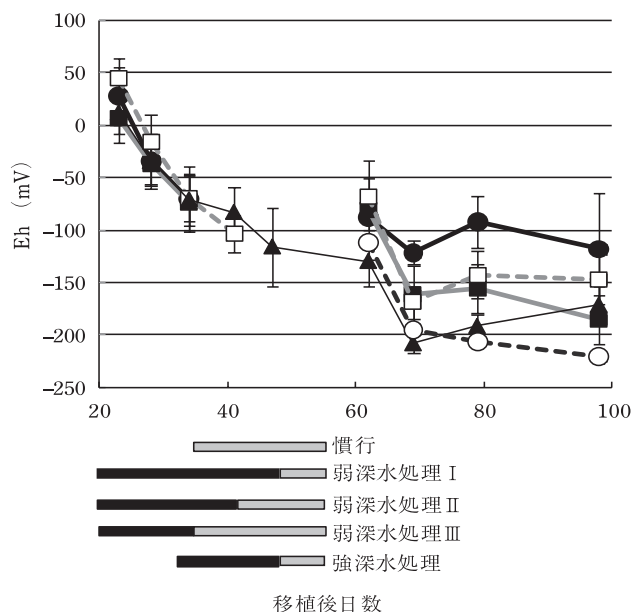
認められなかった.

5. 出穂期と出穂後20日間の平均気温

第8表に、各区の出穂期と北陸研究センター内露場で測定した出穂後20日間の平均気温を示した. 出穂期は慣行区に比べて、強深水区で3~5日、深植区で0~3日、弱深水I区で0~1日、深植弱深水I区で1~4日出穂が遅れた. また、出穂後20日間の気温は2年間の平均で、慣行区に比べて、強深水区で0.2~0.3°Cの低下、深植区で0.1°Cの上昇~0.1°Cの低下、弱深水I区で0.0~0.1°Cの低下、深植弱深水I区で0.1°Cの低下であった. また、高温処理により出穂後20日間の気温は、処理効果がある昼温では約0.5°C上昇したが、夜温も含めた日平均気温では約0.2°Cの上昇にとどまった.

6. 土壌の酸化還元電位の推移と出液速度、貫入抵抗値

第4図に土壌の酸化還元電位の推移を示した. 中干し開



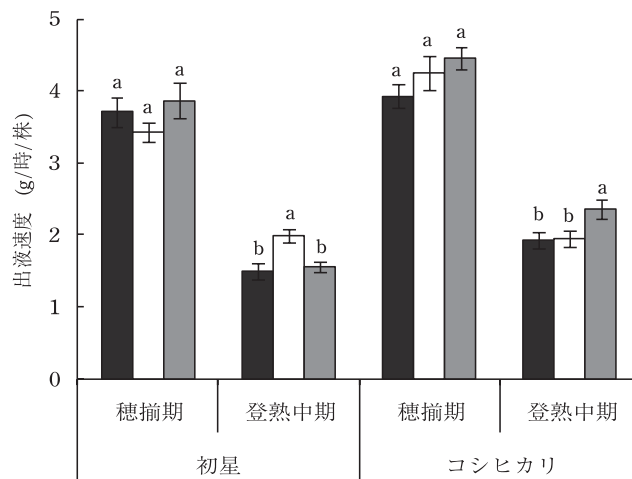
第4図 水管理が土壌の酸化還元電位に及ぼす影響。

●—：慣行，○—：強深水处理，▲—：弱深水处理 I，
 □—：弱深水处理 II，■—：弱深水处理 III。
 ■—：深水处理期間，■—：中干し期間。
 縦棒は標準誤差を示す。

始までは、慣行と弱深水处理ではほぼ同様の酸化還元電位の低下がみられた。深水处理期間中は、酸化還元電位が低下したが、最も処理期間が長い弱深水处理 I でも、処理期間中は -116 mV 以下には低下しなかった。中干し終了後、弱深水处理 II と III は酸化還元電位が -100 mV 以上に高くなり、土壌の還元が緩和されたが、処理期間が長い弱深水处理 I や強深水处理では、還元状態のままであった。さらに、中干し終了後に再入水した後は、弱深水处理 I と強深水处理では、酸化還元電位は大きく低下し、 -200 mV 以下となった。中干しにより、酸化還元電位が慣行と同等以上に高くなった弱深水处理 II と III でも、その後の入水で酸化還元電位は大きく低下し、慣行区よりも強い還元状態になった。このことから、処理水深が深く、処理期間が長いほど土壌は強い還元状態になり、中干しをしても、その後の入水により還元状態に移行しやすくなる可能性がある。

第5図に穂揃期と登熟中期における、株当たりの出液速度を示した。株当たりの出液速度は、穂揃期には、試験区間の有意差が認められなかったが、登熟中期には、初星の強深水区とコシヒカリの深植弱深水 I 区で、他の区より大きくなった。

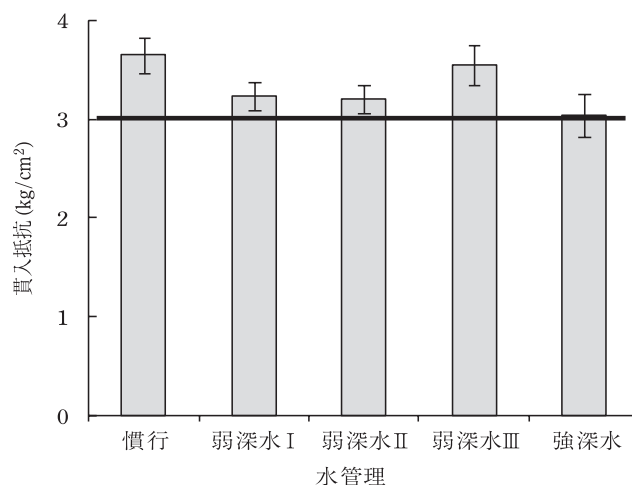
第6図に収穫期の土壌の貫入抵抗値を示した。慣行水管理の地下 15 cm の貫入抵抗値は、 3.66 kg/cm^2 で最も大きかった。深水处理によりやや低下する傾向があり、強深水处理で 0.61 kg/cm^2 、弱深水处理 I で 0.41 kg/cm^2 、弱深水处理 II で 0.44 kg/cm^2 、弱深水处理 III で 0.11 kg/cm^2 低下した。しかし、この差は有意ではなく、いずれの区でも、 3.0 kg/cm^2 以上の貫入抵抗値を示した。



第5図 栽培管理が登熟期の出液速度に及ぼす影響。

■：慣行区，□：強深水区，■：深植弱深水 I 区。

同じ記号は、同一品種同一時期において、試験区間で Tukey の多重比較による 5% 水準の有意差なし。
 縦棒は標準誤差を示す。



第6図 水管理が収穫期における土壌の貫入抵抗に及ぼす影響。

縦棒は標準誤差、横棒はコンバインによる収穫作業可能な目安となる貫入抵抗値を示す。

水管理間で Tukey の多重比較による 5% 水準の有意差はなかった。

考 察

1. 強深水处理および深植による茎数抑制と補償作用

強深水区では、処理開始とともに茎数増加が抑制されて、穂数は減少したが、有効茎歩合が高まった（第2図A、第4表）。この穂数減少の補償作用として、一穂粒数、登熟歩合、玄米千粒重が増加する傾向がみられ（第4表）、白未熟粒割合が減少した（第3図）。しかし、一穂粒数についてみると、処理水深と年次との間に有意差がみられ、年次により影響が異なった（第4表）。2009年の初星では、強深水处理による穂数の減少を、一穂粒数が 16.6% 増加

する等、他の収量構成要素の増加で補償できたために、慣行区と強深水区の収量が同程度になった(第3表, 第4表)。しかし、2008年の初星では、強深水区の慣行区に対する一穂粒数の増加率が3%以下にとどまったため、強深水区の収量は慣行区と比べて大きく低下する傾向がみられた。この収量低下は統計的には有意ではなかったものの、初星の強深水区の収量低下は、過去にもみられており(千葉ら 2009)、穂数の減少を一穂粒数や他の収量構成要素で補償できない場合には、収量が低下する可能性があり、安定収量を得る上で注意が必要である。この一穂粒数の補償効果に品種や年次で差がみられる原因は、今後の検討課題であるが、原因の一つとして寡照が考えられる。事実、2008年は日照条件が良好な年ではあったが、7/7~7/12の日照時間は平年の38.2%、7/24~7/29の日照時間は平年の41.5%と寡照であった(気象庁)。出穂前15~5日頃の減数分裂期を中心とした時期の寡照は退化穎花を増加させて一穂穎花数を減少させる(松島 1959)ことから、7月下旬の寡照期間が一穂粒数の減少に作用した可能性が考えられる。特に2008年の初星で、深植区に比べて、強深水区の一穂粒数の増加率が低い、強深水区の出穂期は深植区に比べて2日遅いため、穎花の退化に関わる時期(7/19~7/29)が7/24~7/29の寡照期間と重なる。しかし、この寡照期間は松島(1959)の穎花が退化する時期に比べて短かったため、退化する穎花は比較的少なく、一穂粒数は慣行区と比べて減少することなく微増となった可能性がある。ただし、2008年はコシヒカリも強深水区での一穂粒数の増加が少ないため、寡照以外の要因も関係していると考えられる。

2009年のコシヒカリでは、強深水区の慣行区に対する穂数の減少率は26.4%であり、これは2008年の8.0%より大きかった(第4表)。2009年のコシヒカリでは、強深水区の慣行区に対する一穂粒数の増加率が17.4%と大きかったが、穂数の減少を十分に補償できず、この年の強深水区の総粒数は慣行区の86.4%となり、2008年の97.6%から10ポイント以上低下した。しかし、登熟歩合の増加により、2009年のコシヒカリ強深水区の収量は慣行区の95.9%が確保された(第3表)。2009年のコシヒカリでは、強深水区の慣行区に対する穂数の減少率は、収量が大きく低下した2008年の初星と同程度であったが、穂数の減少を一穂粒数などの他の収量構成要素で補償することができたため、強深水区の収量が確保されたと考えられる。

深植区では、慣行区に比べて茎数の増加が抑制され(第2図A)、その結果穂数が減少し、一穂粒数が増加した(第5表)。2年間で平均すると、穂数の減少程度と一穂粒数の増加程度が釣り合ったため、慣行区と同程度の総粒数が得られ、慣行区と同等の収量が得られた(第3表)。また、コシヒカリでは、深植により、2008年には総粒数が増加したが登熟歩合が減少し、逆に2009年には総粒数が減少したが登熟歩合と玄米千粒重が増加しており、深植区の収量

は補償された。2年間の平均では、コシヒカリの登熟歩合および玄米千粒重は、慣行区と同程度となった。深植は、穂重型の草型に誘導するという点では、強深水处理と同様の効果を示す。しかし、深植は深水处理のような極端な総粒数の減少がないため、その収量は総粒数の増減に応じて増減するものの、強深水处理に比べて安定していた。

2. 深植による白未熟粒抑制効果

2008年の両品種の高温処理、非高温処理区および2009年の初星高温処理区で、深植区の白未熟粒割合が慣行区より低くなった(第3図)。しかし、その効果は強深水区に劣った。池上(2006)は、深植による穂数の抑制が、酒米の検査等級を向上させたことを報告している。本試験の結果からも、深植は茎数増加を抑制し、その結果、穂数が減少して品質を向上させることが示された。しかし、生育初期の低温は分げつ発生を抑制するため(後藤・星川 1989)、寒冷地で深植を行うと、深植と低温の両方が初期分げつの発生を抑制して、収量確保に必要な茎数が得られない可能性がある。

3. 弱深水处理による茎数と白未熟粒の発生抑制効果

弱深水I区では、慣行区に比べて、茎数増加が抑制され、有効茎歩合が増加し、穂数が減少した(第2図A, 第4表)。しかし、その効果は、強深水区に比べて小さかった。すなわち、処理期間を長くしても、10 cm程度の処理水深では、18 cmの深水处理に比べて茎数抑制効果が小さく有効茎歩合も低かった。これは、処理水深が深くなるほど、深水处理の茎数抑制効果は大きくなることが示した過去の報告と一致する(長尾・岩野 1961, 林ら 2010)。また、弱深水I区では、慣行区に比べて一穂粒数が増加する傾向がみられ、2009年のコシヒカリでは有意差が認められた。弱深水I区では、深植区と同様に、2年間の平均では穂数の減少と一穂粒数の増加で補償され、総粒数は慣行区と同程度となり(第4表)、収量も慣行区と同等であった(第3表)。

弱深水I区の白未熟抑制効果は、2009年の初星非高温処理区では、強深水区と同等であったが、それ以外では、強深水区に劣った。したがって、弱深水栽培だけでは、白未熟粒抑制技術として不十分であると考えられる。

4. 深植と弱深水处理の相互作用

深植と弱深水处理Iを組み合わせた深植弱深水I区では、両処理の効果が加わることにより、深植区および弱深水I区のどちらよりも、最高茎数と穂数の減少が大きく、逆に一穂粒数の増加割合は高かった(第2図A, 第5表)。特に、一穂粒数は顕著に増加し、強深水区より多くなった。このことから、深植と弱深水处理は、茎数抑制と一穂粒数の増加に相加的に作用することが示唆された。また、深植弱深水I区の収量は2年間の平均では、慣行区と同程度であった(第3表)。年次別にみると、極端な多収年である2008

年は慣行区に比べて少なかったものの 600 kg/10 a を越え、2009 年には慣行区を上回ったことから、深植水稻の弱深水栽培は、収量の安定性にも寄与する可能性がある。

次に、深植と弱深水処理を組み合わせた場合の白未熟粒割合に対する効果をみると、深植弱深水Ⅰ区の白未熟粒割合は、白未熟粒の発生が少なかった 2009 年のコシヒカリを除いて、強深水区に次いで低くなった（第 3 図）。特に初星では、その効果が大きく、強深水区に近い抑制効果を示した。したがって、深植水稻の弱深水栽培は白未熟粒の発生抑制にも有効であることが示された。

5. 出穂遅延と白未熟粒の抑制効果

深水处理や深植では、出穂が遅れるため、出穂後 20 日間の平均気温は低下することが多かった（第 8 表）。特に強深水区では、出穂遅延が 3～5 日と大きいので、平均気温が 0.2℃～0.3℃程度低下し、高温処理による温度上昇の 0.2℃が相殺された。今回の実験では、特に強深水区の場合、出穂の遅延が、登熟期の気温を低下させ、白未熟粒の発生抑制に寄与した可能性がある。しかし、2009 年初星の弱深水Ⅰ区のように出穂遅延がなくても、あるいは、2009 年初星の深植弱深水Ⅰ区のように登熟気温が上昇しても、白未熟粒割合が減少している例もあることから、深植や深水处理の白未熟粒抑制効果には、出穂遅延による登熟気温の低下以外の要因も関係していると考えられる。また、強深水区でも、出穂遅延によって登熟期気温が低下しなかった年や、逆に登熟気温が上昇した年に白未熟粒発生の抑制を示す例があり（千葉ら 2009）、強深水処理による白未熟粒の抑制は、登熟気温低下の影響のみではないと考えられる。したがって、本研究での深水处理による白未熟粒の発生抑制効果は、千葉ら（2009, 2011）にみられた茎数抑制とシンクに対するソースの増加に、出穂遅延による気温低下の影響が加わった結果と考えられる。そのなかでも、弱深水Ⅰ区及び深植弱深水Ⅰ区では、気温低下の影響が少なく、茎数抑制とソース増加の効果が大きいと考えられる。

6. 深水处理期間の影響

深植水稻の弱深水処理期間による影響をみたところ、処理期間が短いほど、その茎数抑制効果が減少した（第 2 図 B）。最も処理期間が短い深植弱深水Ⅲ区では処理終了後に他区よりも茎数が増加し、深水处理を行っていない深植区より茎数が多かった（第 2 図 B）。また、穂数、一穂粒数ともに深植弱深水Ⅲ区では、慣行区との間に有意差がなかった（第 6 表）。したがって、茎数を抑制して一穂粒数を増やすことを目的に弱深水処理を行う場合、短期の深水处理では効果が不十分であり、中・長期の処理が必要であると考えられる。

また、深植水稻の弱深水処理期間の白未熟粒発生に及ぼす影響を見ると、試験を行った 2009 年に白未熟粒の発生が少なかったコシヒカリでは傾向が判然としませんが、初星

の非高温処理区における弱深水処理Ⅱ、Ⅲ区の白未熟粒割合は深植弱深水Ⅰ区に比べて高くなっており（第 3 図）、深植弱深水栽培により白未熟粒の発生を抑制するには、最高分げつ期までの弱深水処理が必要であると考えられる。

以上から、深植水稻を弱深水栽培により生育を制御して、白未熟粒の発生を抑制するためには、活着期から最高分げつ期までの処理が必要であると考えられる。

7. 品種別の最適栽培管理

初星についてみると、強深水では、2008 年のように収量が減少傾向になる年があるが、深植弱深水Ⅰ区では、極端な収量低下となる年はなく、慣行区と同程度の収量が確保され、加えて、十分な白未熟粒抑制の効果が得られた。したがって、初星では深植にし、長期間 10 cm 程度の深水で処理する方法が最適な栽培方法であると考えられる。コシヒカリでは、初星とは異なり、年次平均では栽培管理による収量の差はなかった。したがって、安定的に白未熟粒の発生を抑制する強深水栽培が最適な栽培法であると考えられる。2008 年の深植弱深水Ⅰ区の白未熟粒割合は、強深水区に次いで低かったことから、18 cm の湛水ができない圃場では、深植水稻を活着期から最高分げつ期に水深 10 cm の深水处理を行うのが、他の選択肢であると考えられる。ただし、2008 年の深植弱深水Ⅰ区の白未熟粒割合は深植区と同等であり、2009 年は全体的に白未熟粒割合が低く、深植や弱深水処理の効果が判然としなかった。したがって、深水处理を伴わない深植だけで十分なのか、深植と弱深水処理を組み合わせる必要があるのか、今後の検討が必要である。

8. 苗丈と機械移植の可能性

本試験では、深植した苗は、移植直後には、地上部に 9.6～11.0 cm（第 2 表）が出ており、湛水深 4 cm で管理した場合には水面に出るのは 5.6～7.0 cm となる。太田ら（1969）は、品種クサナギで、苗丈 12 cm の移植苗が地上部に 3 cm 以上、水面から 1～2 cm 以上で出ていれば、大きな収量低下はなく、伊藤ら（1970）は、ヨネシロを用いて、苗丈が 10 cm 程度あれば、5 cm の深植をしても収量は減少しないとしており、中苗を 6 cm 程度の深植しても収量は低下しないと考えられる。現在、販売されている田植機は、最大植付深が 5 cm となっている機種が多い。また、一般的に機械移植では、稚苗を用い、その苗丈は 12 cm 程度（星川 1975, 新潟県農林水産部 2005）である。そのため、機械で深植すると、田面に出るのは 7 cm 程度となる。これは、前述の収量が減少しない深植の範囲であり、機械による深植でも収量は確保されることが考えられる。しかし、機械で深植する場合には、苗の水没を防ぐため、苗丈の確保と田面の均平が重要となると考えられる。

9. 地耐力への影響

長時間の深水処理は、土壌の地耐力を低下させ、収穫等の機械作業に支障をきたす可能性がある。そこで、収穫期における土壌の貫入抵抗値を測定したところ、処理水深が深く、期間が長くなるほど、貫入抵抗が低下する傾向がみられた(第6図)。しかし、処理間で有意差はなく、最も低い貫入抵抗値を示した強深水処理でも、収穫期には、コンバインによる収穫作業が可能な基準である 3.0 kg/cm^2 以上(農林水産省生産局・経営局・農村振興局 2008)を満たしたため、深水処理を行っても、大きな地耐力の低下はなく、排水不良田を除くと、収穫作業に支障をきたす可能性は低いと考えられる。

10. 土壌還元への影響

強深水処理や弱深水処理Ⅰを行った圃場では、再度入水した後の登熟期の酸化還元電位が大きく低下し、 -200 mV 以下となった(第4図)。特に処理水深が深く、また処理期間が長い場合には、中干しにより一時的に土壌の酸化還元電位が上昇しても、その後の湛水による酸化還元電位の低下が大きく、還元状態になりやすいと考えられる。水田土壌が還元状態になると、 H_2S が発生する(和田 1984)。 H_2S の発生は、鉄が溶脱している老朽化水田では、特に顕著であり、根腐れが生じることが知られている(三井ら 1949)。そこで、深水処理により酸化還元電位が低下した状態での根の生理活性を調べるために出液速度を測定した。出液速度は根からの能動的吸水を表す指標で(森田・阿部 1999)、水稻に H_2S を施用すると、出液速度が低下することが報告されている(穂積 1969)ことから、 H_2S による根の障害を示すと考えられる。本試験では、圃場の酸化還元電位が大きく低下した強深水区と深植弱深水Ⅰ区の株当たり出液速度を測定した。その結果、両区ともに、出液速度は、穂揃期には慣行区に比べて有意に低下することではなく、登熟中期には、初星の強深水区とコシヒカリの深植弱深水Ⅰ区のように慣行区より高い株当たり出液速度を示す場合もあった(第5図)。このことから、試験を行った圃場の条件では、水田の酸化還元電位が低下しても、根の機能には悪影響を及ぼしていない事が示された。しかし、特に H_2S が発生しやすい水田では、根が障害を受ける可能性があり、深水栽培の導入には注意を要する。これらの結果から、排水不良田や老朽化水田等の H_2S が発生しやすい水田を除けば、活着期から最高分げつ期の水深 10 cm の深水処理や、分げつ盛期から最高分げつ期の水深 18 cm の深水処理では、収穫期の作業性や根系の機能には、大きな悪影響を及ぼさないと考えられる。

11. 食味への影響

深水栽培や深植が食味に及ぼす影響について、2009 年産コシヒカリを用いた食味官能試験により調べたところ、深植区の「硬さ」以外は、慣行区と差がなかった(第7表)。

この年のコシヒカリは、全体的に白未熟粒割合が低く、栽培管理が白未熟発生に及ぼす影響は判然としなかったことも差が小さい要因の1つと考えられる。しかし、本試験で行った栽培管理の範囲では、深水栽培あるいは深植水稻の弱深水栽培を行うことで明確な食味の低下はないと考えられる。

以上から、初星では、深植した水稻を活着期から最高分げつ期まで水深 10 cm の深水栽培するのが最適であると考えられる。コシヒカリでは、湛水深が確保できる圃場では、分げつ盛期から最高分げつ期にかけての水深 18 cm の深水栽培が最適な栽培法である。また、十分な湛水深が確保できない圃場では、深植+弱深水処理が効果的であると考えられるが、より省力的な深植のみでも同様な効果が得られる可能性がある。

謝辞：食味官能試験を実施するにあたり、中央農業総合研究センター低コスト稲研究北陸サブチームのご指導とご協力を頂いた。三浦清之サブチーム長と重宗明子博士をはじめとする同サブチームの方々およびパネラーの皆様には深く感謝申し上げます。また、中央農業総合研究センター農業気象災害研究チームには、気象データを提供して頂いた。深く感謝申し上げます。本論文のとりまとめにあたり、中央農業総合研究センターの廣瀬竜郎博士、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科の小竹剛志氏、丸山義明氏、栗崎利幸氏には圃場管理にご尽力頂き、稲収量性研究北陸サブチームの杉浦尚美氏には生育調査にご協力頂いた。皆様に深く感謝申し上げます。

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.
- 千葉雅大・松村修・寺尾富夫・高橋能彦・渡邊肇 2009. 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. 日作紀 78: 455-464.
- 千葉雅大・松村修・寺尾富夫・高橋能彦・渡邊肇 2011. 深水栽培による米粒外観品質向上要因の解析. 日作紀 80: 13-20.
- 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.
- 後藤雄佐・星川清親 1989. 水稻の分げつ性に関する研究 第4報 分げつ性に及ぼす温度の影響. 日作紀 58: 63-73.
- 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.
- 林元樹・谷俊男・遠藤征馬・田中雄一・山内章 2010. かんがい水深が深水無落水栽培の水稻に与える影響. 東海作物研究 140: 15.
- 星川清親 1975. 解剖図説 イネの生長 III 苗の生長と苗質. 農文協, 東京. 59-80.
- 穂積清之 1969. 水稻に関する研究 第3報 硫化水素処理が溢泌液および液内無機成分におよぼす影響. 日作紀 39: 191.
- 池上勝 2006. 米米における温暖化の影響解明と品質向上対策としての深植え栽培の効果. ひょうごの農林水産技術-農業編-, 145: 4.

- 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. 水稻稚苗移植栽培の植付深. 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.
- 気象庁. 気象統計情報. <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (2010/7/26 閲覧).
- 松島省三 1959. 稲作の理論と技術 第 8 章 一穂初数はいつ決まるか. 養賢堂, 東京. 95–100.
- 三井進午・橋本秀教・寺澤四郎 1948. 老朽化水田に於ける水稻根の生理的障害発生機作に関する研究. 土肥誌 19 : 59–61.
- 森田茂紀・阿部淳 1999. 出液速度の測定・評価方法. 根の研究 8 : 117–119.
- 長尾友春・岩野勇雄 1961. 灌漑水の深さが水稻の形態, 生態に及ぼす影響 (予報). 日作九支報 17 : 45–47.
- 新潟県農林水産部 2005. 水稻栽培指針. 29.
- 農林水産省構造改善局資源部資源課 2000. 土地改良事業設置基準・計画 ほ場整備 (水田). 農業土木学会, 東京. 110–111.
- 農林水産省生産局・経営局・農村振興局 2008. 特定高性能農業機械の導入に関する計画の策定及びその取扱いについて－ガイドライン－. http://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_kikaika/hosin/pdf/guide_line.pdf (2010/7/26 閲覧).
- 農林水産省水稻高温対策連絡会議対策推進チーム 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> (2010/7/26 閲覧).
- 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度の許容度について. 日作東海支部研究梗概 54 : 1–3.
- 重宗明子・笹原英樹・後藤明俊・三浦清之・吉田智彦 2007. 水稻品種育成地における食味官能試験の精度の検討. 日作紀 76 : 306–310.
- Terao, T., S. Miura, T. Yanagihara, T. Hirose, K. Nagata, H. Tabuchi, H. Y. Kim, M. Loeffering, M. Okada and K. Kobayashi 2005. Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice. J. Sci. Food Agric. 85 : 1861–1868.
- 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.
- 和田秀徳 1984. 新土壌学 IX 水田土壌. 朝倉書店, 東京. 159–183.
- 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.
- 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.

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

Abstract : Suppression of the occurrence of chalky grains caused by a high temperature at the ripening stage of rice is an urgent issue in rice production in Japan. Deep flood irrigation with a water depth of 18 cm is an effective measure to avoid the occurrence. However, the area of paddy fields that can keep this level of water depth is limited, because the plants are usually not so high. Here, we examined the effects of flood irrigation at a water depth of 10 cm and deep planting (depth of 6 cm), and their combination on the yield and quality of rice using cultivars Hatsuboshi and Koshihikari which are sensitive and moderately tolerant to a high temperature at the ripening stage, respectively. In Hatsuboshi, deep planting combined with 10-cm irrigation from the rooting stage to the maximum tillering stage reduced the occurrence of chalky grains without yield reduction that was caused by an 18 cm flood irrigation. In Koshihikari, 18-cm flood irrigation was the best to reduce chalky grains, but 10-cm flood irrigation also reduced chalky grains significantly without significant yield reduction. Deep flood irrigation (18 cm) decreased the redox potential of soil, but did not damage the root system at the ripening stage. In addition deep flood irrigation did not reduce soil-bearing capacity, and was not considered to prevent combine harvesting.

Key words : Chalky grain, Deep-flood irrigation, Deep planting, Rice.