

## 水稻深水栽培は茎のソース機能を高めることにより 2次枝梗籾が増加しても白未熟粒の発生を抑える

千葉雅大<sup>1)</sup>・松村修<sup>1)</sup>・渡邊肇<sup>2)</sup>・高橋能彦<sup>2)</sup>・寺尾富夫<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup> 中央農業総合研究センター, (<sup>2)</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科)

**要旨**：深水栽培は高品質米の生産技術として有効な栽培法である。深水栽培の稲体では、分げつの発生が抑制されて、ソース機能が高い強勢分げつ中心の構成になり、これが白未熟粒発生に影響していると考えられる。そこで、強勢と考えられる主茎と弱勢と考えられる2次分げつ（慣行区のみ）および最上位1次分げつについて、ソース機能に関する形質として、穂揃期の葉身窒素量と葉鞘・稈の非構造化炭水化物量および登熟期の葉面積を測定した。また、穂内の1次および2次枝梗の着生籾数を調査した。その結果、深水栽培では、主茎と最上位1次分げつの両方で、慣行栽培に比べて、籾あたりのソース機能は増加し、白未熟粒割合が低下した。つまり、深水栽培では、強勢・弱勢にかかわらず、すべての次数の茎で籾あたりのソース機能が増加し、白未熟粒の発生が抑制された。したがって、1穂籾数が増加して、品質が低下しやすい2次枝梗籾の割合が増加しても、ソース機能の増加により、白未熟粒の発生が抑制されたと推察される。

**キーワード**：イネ、白未熟粒、ソース機能、2次枝梗籾、1穂籾数、深水栽培、分げつ。

近年の登熟期の気温上昇による米粒の品質低下に対し、千葉ら（2009）は、分げつ盛期～最高分げつ期の深水栽培が、白未熟粒の発生を抑制し玄米の外観品質を高めることを明らかにした。また、白未熟粒は、胚乳のデンプン粒の充実不足により発生することから（田代・江幡 1975）、シンクである籾への茎葉からの炭水化物供給に着目して、深水栽培で白未熟粒の発生が抑制される要因を解析した結果、深水栽培を行った稲体では、出穂前に茎葉に蓄積される炭水化物と登熟期の光合成機能がともに増加した（千葉ら 2011a）。また、深水栽培は受光体勢を改善させる（Oheら 2010）。したがって、株全体で平均した場合には、シンクである籾へのソース機能の向上が、深水栽培で白未熟粒の発生が減少する要因であると考えられた。

このソース機能向上の原因として、深水栽培では、分げつ構成等の株の形態が大きく変化することが挙げられる。例えば、深水栽培では過剰分げつの発生が抑制されて最高分げつ期の茎数が減少し、穂数は少なくなるが、逆に1穂籾数は増加し、有効茎歩合が高くなる（菅井ら 1999, 千葉ら 2009, Hayashiら 2011）。また、深水栽培では弱勢な2次分げつおよび上位節の1次分げつの穂は少なくなり、強勢な主茎と下位・中位節の1次分げつの穂が中心となる（千葉ら 2009, 佐藤ら 2002）。この弱勢茎の減少と、ソース機能が大きい強勢茎の有効茎に占める割合の増加によって、深水栽培では、株全体として籾あたりのソース機能が増加したと考えられる。ただし、このソース機能の増加が、分げつ構成の変化による単独の効果なのか、それとも、これに加えて、各々の1次分げつや主茎のソース機能自体も増加したかは不明である。そこで、代表的な強勢茎と弱勢茎

を用いて、慣行栽培および深水栽培を行ったときの、籾へのソース機能に関連する形質（穂揃期の葉鞘・稈の非構造化炭水化物（NSC）量および葉身窒素量、登熟期の葉面積）を茎の次数（主茎, 1次分げつ, 2次分げつ）別に調査して、水管理によりソース機能の変化があるのかどうか、またその変化が白未熟粒発生に影響を及ぼしているかどうか解析した。

### 材料と方法

#### 1. 栽培管理の概要

初星およびコシヒカリの水稻（*Oryza sativa* L.）2品種を供試した。高温登熟耐性は初星が弱く、コシヒカリは中程度である（石崎 2006, 若松ら 2005, 山川・神田 2003）。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で2007年と2008年に行った。2007年は5月20日、2008年は5月21日に中苗を栽植密度22.2株/m<sup>2</sup>、1株3本で手植し、基肥として化成肥料（N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>Oを各15%含有）を各成分で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する深水区とを設け、2007年は3反復、2008年は2反復で試験を行った。

慣行区と深水区の水管理は、千葉ら（2009）に示した通りである。すなわち、慣行区では、移植直後は水深4 cm程度、活着後は2 cm程度の浅水で管理し、6月下旬に落水し、田面に亀裂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、6月中旬から7月上旬の約20日間（2007年：6月18日～7月6日、2008年：6月23日～7月11日）、水深18 cmの深水処理を行った。この期間は、概ね各年次の分けつ盛期から最高分けつ期に相当する。深水処理終了後、1週間程度の中干しを行い、その後は慣行区と同様に間断灌漑を行った。

### 3. 調査対象の茎、調査項目および統計解析

強勢な茎の代表として主茎を、弱勢茎として、有効化した最上位1次分けつおよび2次分けつを調査対象とした。2次分けつについては、同一個体内で2本以上が有効化した場合には、中庸な穂を持つ分けつ1本を調査した。1株3本植のため、1株あたり3個体を調査した。深水区では、2次分けつの発生がほとんどなかったため、主茎と最上位1次分けつのみを調査対象とした。最上位1次分けつは、両品種ともに、2007年の深水区では、主茎の第6節と第7節から同程度の割合で出ていたが、2007年の慣行区と2008年の両区では、第7節からの発生が最も多くなった。また、調査対象の2次分けつは、主茎の第5節から発生した1次分けつから出ているものが最も多く、第4節由来がこれに次いだ。

穂揃期に反復ごとに6株をサンプリングして、主茎、最上位1次分けつ、2次分けつについて、それぞれ、穂、葉身、葉鞘・稈の3つに分解した。分解した穂を用いて、1穂粒数を測定し、2008年は2次枝梗粒の割合を調べた。葉鞘・稈については、乾物重を測定し、その後、重量法（大西・堀江1999）で非構造炭水化物（NSC）割合を測定した。また、葉身について、葉面積を測定し、乾物重の測定後に窒素・タンパク質分析装置（rapidN III, Elementar社、ハナウ、ドイツ）を用いてデュマ燃焼法で全窒素濃度を測定した。登熟中期（出穂20日後頃）および成熟期についても、6株をサンプリングして、主茎および最上位1次分けつ、2次分けつの1穂粒数および葉面積を測定した。

成熟期にサンプリングした穂を粳摺りして、粒厚1.8 mm以上の玄米について、穀粒判別器（ES-1000、静岡製機）で、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、白未熟粒割合、1穂粒数、2次枝梗粒割合および粳あたりの葉身窒素量、葉鞘・稈NSC量、葉面積について、エクセル統計2010（社会情報サービス）を用いて、同一品種、年次内において、水管理の効果と茎の次数の効果に関する分散分析を行った。この際、慣行区の2次分けつについては、対応する深水区がないために分散分析の対象としなかったが、茎の次数間差をみるため、慣行区内でTukeyの多重比較を行った。

## 結 果

### 1. 白未熟粒割合

第1表に調査対象茎の白未熟粒割合を示す。白未熟粒の

第1表 茎の次数別にみた慣行区と深水区の白未熟粒割合。

品種	年次	試験区	茎の次数	白未熟粒割合 (%)
初星	2007	慣行区	主茎	8.87 a <sup>†</sup>
			最上位1次分けつ	4.76 b
			2次分けつ	4.72 b
		深水区	主茎	3.65
			最上位1次分けつ	3.97
			水管理	***
	2008	慣行区	茎の次数	*
			水管理 × 茎の次数	***
			主茎	6.08 ab
		深水区	最上位1次分けつ	7.95 a
			2次分けつ	4.17 b
			主茎	1.68
コシヒカリ	2007	慣行区	最上位1次分けつ	2.95
			2次分けつ	***
			茎の次数	*
		深水区	水管理 × 茎の次数	ns
			主茎	2.00 a
			最上位1次分けつ	1.80 a
	2008	慣行区	2次分けつ	2.35 a
			主茎	0.94
		深水区	最上位1次分けつ	0.49
			水管理	***
			茎の次数	ns
			水管理 × 茎の次数	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。

<sup>†</sup>: 異なる文字は、慣行区内において茎の次数間の多重比較をTukeyの方法で行った結果、5%水準で有意差があることを示す。

内訳のうち、2007年の初星では基部未熟粒の発生割合が最も高かったが、これ以外では、概ね乳白粒の発生割合が最も高かった（データ省略）。水管理の影響をみると、初星とコシヒカリの両品種で、2007年と2008年の両年で、深水処理により有意に白未熟粒の発生が減少した。この深水処理の発生抑制効果は、基部未熟粒や腹白粒に比べて、乳白粒で大きい傾向がみられた（データ省略）。次に茎の次数の影響をみると、初星では2007年は、主茎の白未熟粒割合が、最上位1次分けつに比べて、有意に増加したが、2008年は逆に低下した。しかし、2007年は水管理 × 茎の次数の相互作用があり、深水区では主茎の白未熟粒割合は、

第2表 茎の次数別にみた慣行区と深水区の穂揃期における籾あたりの葉鞘・稈 NSC と葉身窒素および登熟期（穂揃期，登熟中期，成熟期）における葉面積。

品種	年次	試験区	茎の次数	葉身窒素量 (mg/粒)	NSC 量 (mg/粒)	葉面積 (cm <sup>2</sup> /粒)		
						穂揃期	登熟中期	成熟期
初星	2007	慣行区	主茎	0.206 a <sup>†</sup>	6.29 a	1.59 a	1.12 b	0.83 a
			最上位1次分げつ	0.170 b	5.05 b	1.33 b	1.10 b	0.81 a
			2次分げつ	0.191 ab	4.28 c	1.82 a	1.39 a	0.99 a
		深水区	主茎	0.259	8.85	1.66	1.26	1.12
			最上位1次分げつ	0.244	7.57	1.66	1.14	1.01
			水管理	***	***	***	ns	***
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	**	***	*	ns	ns
			水管理 × 茎の次数	ns	ns	*	ns	ns
			水管理 × 茎の次数	ns	ns	*	ns	ns
	2008	慣行区	主茎	0.236 a	4.81 a	1.67 a	1.29 ab	0.78 b
			最上位1次分げつ	0.191 b	3.81 b	1.41 b	1.14 b	0.83 b
			2次分げつ	0.221 a	3.78 b	1.79 a	1.39 a	1.04 a
		深水区	主茎	0.254	7.33	1.81	1.45	1.06
			最上位1次分げつ	0.221	5.81	1.99	1.31	1.11
			水管理	***	***	***	***	***
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	***	***	ns	**	ns
			水管理 × 茎の次数	ns	ns	***	ns	ns
			水管理 × 茎の次数	ns	ns	***	ns	ns
コシヒカリ	2007	慣行区	主茎	0.150 ab	5.81 a	1.18 b	0.83 b	0.53 ab
			最上位1次分げつ	0.138 b	4.75 b	1.23 b	0.81 b	0.45 b
			2次分げつ	0.166 a	4.74 b	1.63 a	1.08 a	0.67 a
		深水区	主茎	0.211	7.57	1.37	1.02	0.67
			最上位1次分げつ	0.195	5.72	1.34	1.13	0.64
			水管理	***	***	**	***	***
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	*	***	ns	ns	*
			水管理 × 茎の次数	ns	ns	ns	ns	ns
			水管理 × 茎の次数	ns	ns	ns	ns	ns
	2008	慣行区	主茎	0.204 a	5.57 a	1.38 a	0.97 b	0.56 b
			最上位1次分げつ	0.186 a	4.63 b	1.38 a	1.02 b	0.71 b
			2次分げつ	0.190 a	4.01 b	1.49 a	1.25 a	0.90 a
		深水区	主茎	0.188	8.07	1.55	1.25	0.80
			最上位1次分げつ	0.187	6.43	1.70	1.44	0.94
			水管理	ns	***	***	***	***
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	*	***	ns	***	*
			水管理 × 茎の次数	*	ns	*	*	ns
			水管理 × 茎の次数	*	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。

†: 異なる文字は、慣行区内において茎の次数間の多重比較を Tukey の方法で行った結果、5%水準で有意差があることを示す。

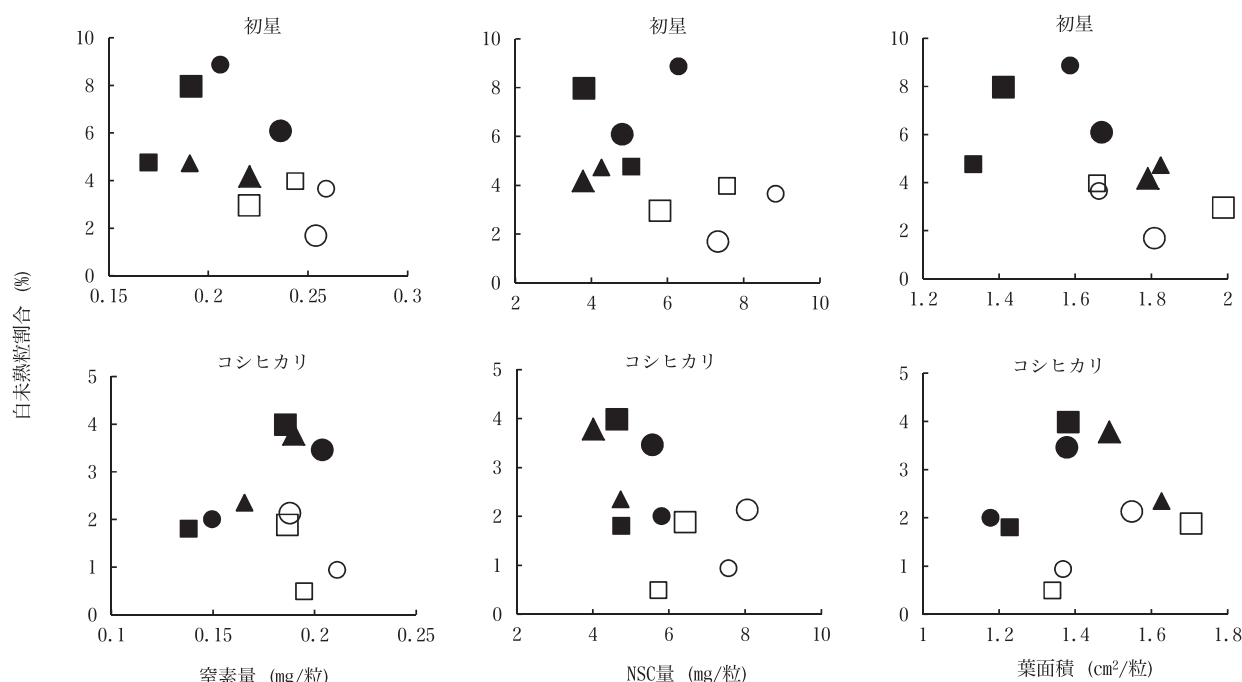
最上位1次分げつに比べて、増加しなかった。一方、コシヒカリでは茎の次数間差がみられなかった。2次分げつについて、慣行区内における茎の次数間差のみを Tukey の多重比較により解析した。その結果、コシヒカリでは茎の次数間で有意差はなかったが、初星では、2007年には、最上位1次分げつと2次分げつの白未熟粒割合が、主茎に比べて有意に減少し、2008年には、2次分げつの白未熟粒割合が最上位1次分げつに比べて、有意に減少した。また、2008年の初星では、2次分げつの白未熟粒割合が主茎に比べて減少する傾向がみられた。

## 2. 穂揃期における葉身窒素量

調査対象茎の穂揃期における籾あたり葉身窒素量を第2表に示す。なお、千葉ら(2011a)では、葉身窒素含有率も検討したが、深水処理の効果が一定せず、籾あたり葉身窒素量の方がソース機能の指標として適切であったため、本試験では、籾あたり葉身窒素量のみを示す。

深水区と慣行区で比較すると、両年の初星と2007年のコシヒカリでは、籾あたり葉身窒素量は、深水処理により増加した。一方、2008年のコシヒカリでは、深水処理による籾あたり葉身窒素量への影響は認められなかった。

主茎と最上位1次分げつの間で、籾あたり葉身窒素量を



第1図 穂揃期における籾あたりの葉身窒素量(左), 葉鞘・稈 NSC 量(中央) および葉面積(右)と白未熟粒割合との関係。  
 ●: 慣行区主茎, ■: 慣行区最上位1次分げつ, ▲: 慣行区2次分げつ, ○: 深水区主茎, □: 深水区最上位1次分げつ。  
 小さいプロットは2007年, 大きいプロットは2008年を示す。

比較すると, いずれの品種・年次においても, 主茎の方が有意に大きくなった。また, 慣行区内における多重比較の結果, 2次分げつの籾あたり葉身窒素量も最上位1次分げつに比べて, 増加する傾向があり, 2008年の初星と2007年のコシヒカリでは有意差がみられた。

第1図(左)に穂揃期における籾あたり葉身窒素量と白未熟粒割合の関係を示す。2008年のコシヒカリでは, 深水処理による白未熟粒割合および籾あたり葉身窒素量の有意差はなかったが(第1表, 第2表), これ以外では, 主茎と最上位1次分げつの両方で, 深水区のプロットは慣行区の右下にあり, 深水処理により, 籾あたり葉身窒素量が増加し白未熟粒割合が低下した(第1図)。

### 3. 穂揃期における葉鞘・稈のNSC量

調査対象茎の穂揃期における葉鞘・稈の籾あたりNSC量を第2表に示す。主茎および最上位1次分げつの籾あたりNSC量は, 深水処理により有意に増加した。また, 主茎の籾あたりNSC量は, 最上位1次分げつに比べて, 有意に増加した。慣行区内における多重比較の結果, 2次分げつでも, 最上位1次分げつと同様に, 籾あたりNSC量は両年・両品種において, 主茎に比べて有意に減少した。また, 2007年の初星では, 2次分げつの籾あたりNSC量は, 最上位1次分げつに比べても, 有意に減少した。

第1図(中央)に穂揃期における籾あたり葉鞘・稈のNSC量と白未熟粒割合の関係を示す。いずれの品種・年次においても, 深水処理による有意な白未熟粒割合の減少と籾あたりNSC量の有意な増加が認められ(第1表, 第2表),

第1図でも主茎と最上位1次分げつの両方で, 深水区のプロットは慣行区の右下にあり, 深水処理により, 籾あたりNSC量が増加し白未熟粒割合が低下した。

### 4. 登熟期の葉面積

穂揃期, 登熟中期および成熟期の3回に分けて測定した調査対象茎の籾あたり葉面積を第2表に示す。両品種ともに, 穂揃期から成熟期までの全登熟期間を通して, 深水処理により籾あたり葉面積が増加する傾向がみられ, 2007年初星の登熟中期以外は有意差が認められた。

また, 主茎と最上位1次分げつ間で籾あたり葉面積を比較すると, 初星では2007年の穂揃期および2008年の登熟中期で主茎の方が, 最上位1次分げつより大きくなった。コシヒカリをみると, 主茎の籾あたり葉面積は, 最上位1次分げつに比べて, 2007年の成熟期では有意に増加したが, 2008年の登熟中期および成熟期では, 逆に有意に減少した。また, 慣行区内における多重比較の結果, 2次分げつの籾あたり葉面積は, 最上位1次分げつに比べて増加する傾向がみられ, 2007年の初星成熟期と2008年のコシヒカリ穂揃期を除いて, 有意差が認められた。2次分げつの籾あたり葉面積は, 主茎よりも大きい傾向がみられ, 初星では2007年登熟中期と2008年成熟期で, コシヒカリでは2007年の成熟期と2008年の穂揃期を除いて, 主茎よりも有意に大きかった。

第1図(右)に穂揃期の籾あたり葉面積と白未熟粒割合の関係を示す。いずれの品種・年次においても, 深水処理による有意な白未熟粒割合の減少と籾あたり葉面積の有意



第3表 茎の次数別にみた慣行区と深水区の1穂粒数と2次枝梗割合。

品種	年次	試験区	茎の次数	1穂粒数 (粒)	2次枝梗割合 (%)
初星	2007	慣行区	主茎	75.4 a <sup>†</sup>	
			最上位1次分げつ	54.8 b	
			2次分げつ	40.5 c	
		深水区	主茎	81.1	
			最上位1次分げつ	62.3	
			水管理	***	
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	***	
			水管理 × 茎の次数	ns	
			主茎	77.7 a	36.0 a
	2008	慣行区	最上位1次分げつ	63.5 b	30.7 b
			2次分げつ	54.5 c	26.0 b
		深水区	主茎	81.4	36.2
			最上位1次分げつ	63.7	31.1
			水管理	***	ns
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	***	**
			水管理 × 茎の次数	ns	ns
コシヒカリ	2007	慣行区	主茎	95.7 a	
			最上位1次分げつ	70.4 b	
			2次分げつ	48.6 c	
		深水区	主茎	103.6	
			最上位1次分げつ	77.0	
			水管理	***	
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	***	
			水管理 × 茎の次数	ns	
			主茎	98.8 a	42.1 a
	2008	慣行区	最上位1次分げつ	76.8 b	37.8 ab
			2次分げつ	64.4 c	35.7 b
		深水区	主茎	108.8	46.7
			最上位1次分げつ	75.9	36.9
			水管理	ns	*
		水管理 × 茎の次数	茎の次数	***	***
			水管理 × 茎の次数	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。

<sup>†</sup>: 異なる文字は、慣行区内において茎の次数間の多重比較を Tukey の方法で行った結果、5%水準で有意差があることを示す。

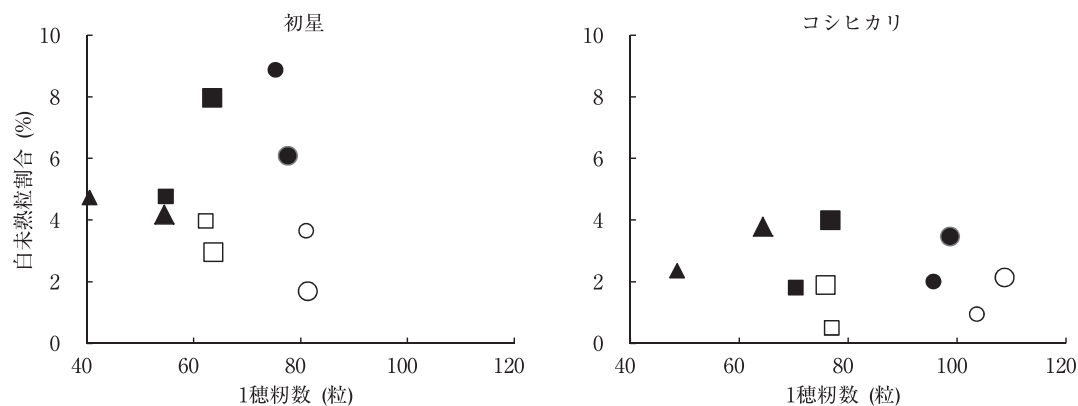
な増加が認められ（第1表、第2表）、第1図でも主茎と最上位1次分げつの両方で、深水区のプロットは慣行区の右下にあり、深水処理により、籾あたり葉面積が増加し白未熟粒割合が低下した。なお、登熟中期と成熟期の籾あたり葉面積は図に示していないが、穂揃期と同様な傾向がみられた。

#### 5. 1穂粒数と、白未熟粒割合および2次枝梗割合との関係

第3表に調査対象茎である主茎および最上位1次分げつ、2次分げつの1穂粒数と2次枝梗割合を示す。まず1穂

粒数についてみると、両年の初星と2007年のコシヒカリでは、深水処理により有意に増加した。また、2008年のコシヒカリでも深水処理により、主茎の1穂粒数が増加する傾向がみられた。また、品種・年次によらず、主茎の1穂粒数は最上位1次分げつに比べて、有意に多くなった。慣行区における多重比較の結果、2次分げつの1穂粒数は、主茎よりも少ない最上位1次分げつに比べても、有意に減少した。

第2図に1穂粒数と白未熟粒割合の関係を示す。2008年のコシヒカリ最上位1次分げつを除いて、深水区のプロットは慣行区の右下にあり、深水処理により1穂粒数が増加



第2図 1穂粒数と白未熟粒割合との関係。

●: 慣行区主茎, ■: 慣行区最上位1次分げつ, ▲: 慣行区2次分げつ, ○: 深水区主茎, □: 深水区最上位1次分げつ。

小さいプロットは2007, 大きいプロットは2008年を示す。

して、白未熟粒割合が減少した。また、初星慣行区では、有意ではないが、1穂粒数が増えるほど白未熟粒が増加する傾向が認められた。一方、初星の深水区では、このような関係は認められず、1穂粒数が増加しても、白未熟粒の発生は増えなかった。

2008年のサンプルについて、穂内の枝梗次位別の着粒数を調べると、両品種で、主茎の2次枝梗割合は最上位1次分げつに比べて有意に高くなった(第3表)。次に、水管理の影響をみると、コシヒカリでは深水処理により2次枝梗割合が有意に増加したが、初星では差はなかった。また、慣行区における多重比較の結果、2次分げつの2次枝梗割合は、主茎に比べて有意に減少し、最上位1次分げつに比べても減少する傾向がみられた。

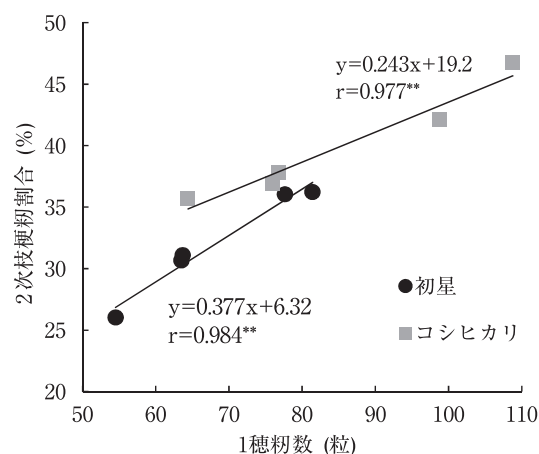
2008年の両品種における茎の次数別の1穂粒数と2次枝梗割合との関係を見ると、有意な正の相関関係があり、1穂粒数が増加すると、2次枝梗割合が高くなった(第3図)。しかし、その回帰直線の傾きは品種により異なり、初星の方が、1穂粒数の増加に対する2次枝梗割合の増加割合が高かった。

## 6. 茎のソース機能にかかわる形質と1穂粒数

第4図にソース機能にかかわる形質として、穂揃期における茎あたり葉面窒素量(左)および葉鞘・稈NSC量(中央)、葉面積(右)と、1穂粒数との関係を示す。いずれの形質においても、1穂粒数との間に正の相関が認められた。しかし、その回帰直線の傾きは、水管理により異なり、コシヒカリの窒素量を除いて、深水区では、慣行区に比べて低下する傾向があり、ソース機能が大きく増加した割には、深水区の1穂粒数の増加は少なかった。

## 7. 登熟期の気象条件

第4表に出穂期と出穂後20日間の平均気温および平均日射量を示す。深水処理により出穂期は、初星で5日、コ



第3図 各品種の1穂粒数と2次枝梗割合の関係。

2008年の水管理および茎の次数別のデータをプロットした。

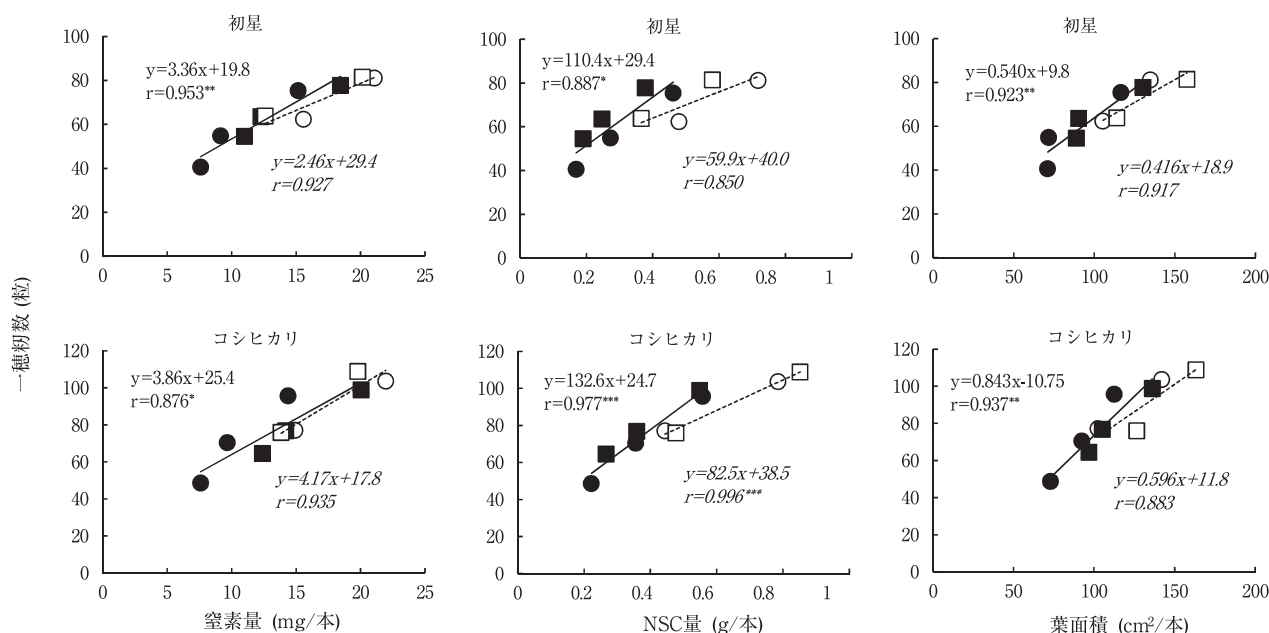
\*\*は1%水準で有意な相関があることを示す。

シヒカリで4日遅くなった。気温をみると、2007年は高温年であり、出穂後20日間の平均気温は28.1℃～28.7℃となった。また、初星では試験区間の差はなかったが、コシヒカリでは慣行区に比べて深水区の方が0.6℃高くなった。2008年は、2007年に比べて低温で、出穂後20日間の平均気温は24.9～26.2℃であった。この年は、両品種で慣行区の方が深水区より登熟気温が高く、その差は初星で0.5℃、コシヒカリで0.2℃であった。

次に、出穂後20日間の平均日射量をみると、2007年の方が2008年に比べて日射量が大きかった。また、いずれの品種・年次においても、慣行区の日射量は深水区より大きく、その差は1.0～1.5 MJ/m<sup>2</sup>であった。

## 考 察

前報では、全ての次位の分げつを含む株全体を用いた解析において、深水栽培により籾あたりのソース機能が向上して白未熟粒の発生割合が減少することを報告した(千葉



第4図 穂揃期における茎あたりの葉身窒素量(左)、葉鞘・稈 NSC 量(中央)および葉面積(右)と1穗数との関係。

●：2007年慣行区，○：2007年深水区，■：2008年慣行区，□：2008年深水区。

実線は慣行区，点線は深水区の回帰直線を示す。正字体は慣行区，斜字体は深水区の回帰式および相関係数を示す。

\*, \*\*, \*\*\* は、それぞれ 5%, 1%, 0.1% 水準で有意な相関があることを示す。

第4表 慣行区と深水区の出穂期および、出穂後20日間の平均気温と平均日射量。

品種	試験区	出穂期		気温 (°C)		日射量 (MJ/m <sup>2</sup> )	
		2007年	2008年	2007年	2008年	2007年	2008年
初星	慣行区	8月1日	7月29日	28.2	26.2	21.1	19.0
	深水区	8月6日	8月3日	28.2	25.6	20.1	17.7
	深水区－慣行区	5	5	0.0	-0.5	-1.0	-1.2
コシヒカリ	慣行区	8月5日	8月6日	28.1	25.1	20.2	16.5
	深水区	8月9日	8月10日	28.7	24.9	18.8	15.2
	深水区－慣行区	4	4	0.6	-0.2	-1.5	-1.3

気温と日射量は、中央農業総合研究センター・北陸研究センター気象観測露場の観測データ。

小数点第2位を四捨五入したため、表中の慣行区と深水区の差は、必ずしも深水区－慣行区とは一致しない。

ら 2011a)。しかし、この籾あたりソース機能の向上と白未熟粒の減少は、弱勢茎の割合の減少のみによるものなのか、それに加えて、個々の茎の籾あたりソース機能の増加も寄与しているのかは明らかではなかった。本試験では、強勢な主茎と弱勢な最上位1次分げつのいずれでも、深水処理による白未熟粒の発生抑制が認められた(第1表)。また、主茎および最上位1次分げつでは、深水処理により、穂揃期における籾あたり葉身窒素量および籾あたり NSC 量、籾あたり葉面積が、2008年コシヒカリの窒素量以外は全て増加し、白未熟粒割合が低下した(第1図)。唯一の例外である2008年のコシヒカリでも、NSC量や葉面積の増加がみられ、籾あたりソース機能の増加は同様に起こっていると考えられる。したがって、個々の茎における籾あたりソース機能の増加が、白未熟粒の減少に寄与していることが本研究で明らかになった。この個々の茎のソース機能の

増加は、慣行栽培であれば2次分げつの発生に使われていた炭水化物や窒素等の成分が、主茎や1次分げつの充実に使われたために起こったと考えられる。出穂前に茎葉に蓄積される炭水化物の量や登熟期の光合成機能の向上は、乳白粒を中心とした白未熟粒の発生を大きく減少させることが分かっている(小葉田ら2004, 小谷ら2005, 千葉ら2011a)。このように、深水栽培は、強勢茎の割合を高めるだけでなく、強勢な主茎においても、また、弱勢な最上位1次分げつにおいても、ソース機能を向上させることによって白未熟粒の発生が抑制されることが明らかとなった。

また、この深水処理によるソース機能向上と白未熟粒発生抑制効果は試験を行った2年間を通して観測された。登熟期の高温低日射は、白未熟粒の発生を増加させることが知られており(近藤ら2007)、2007年には高温が、また、2008年には低日射が白未熟粒の発生を助長したと考えられ

る(第4表)。特に2007年のコシヒカリでは、深水区の方が、登熟期の気温が高かったにもかかわらず、白未熟粒の発生は減少した。したがって、深水处理による白未熟粒の減少は、出穂期の遅れによる登熟気温の低下が主要因ではないことが確認された(千葉ら2009)。また、年次、品種にかかわらず、深水区の方が低日射であったにもかかわらず、白未熟粒は減少した。しかし、いずれの年においても深水处理により、ソース機能が高まっており(第4図)、多少の高温や低日射の影響を上回るソース機能の向上効果により、条件が異なる両年においても安定して白未熟粒の発生が抑制されたと考えられる。

1穂粒数と白未熟粒割合の関係をみると、初星、コシヒカリの両品種ともに、深水处理により1穂粒数が増加したにもかかわらず、白未熟粒割合が低下する傾向が認められた(第2図)。また、2008年の結果では、1穂粒数の増加に伴って2次枝梗粒割合が増加する傾向が得られた(第3図、第3表)。2次枝梗粒数を調査したのは2008年のみであるが、2007年にも1穂粒数は増えているため、同様に2次枝梗粒も増えていた可能性が高い。通常、粒数が増えると、ソース機能が同等以上に増加しなければ粒あたりのソース量が不足して白未熟粒が増えることが想定される。実際、1穂粒数が増えると白未熟粒が増えることが報告されており(高橋2006、吉野ら2007)、圃場条件でも粒数過多が乳白粒発生を招くことが知られている(井上ら2004、高橋2006)。また、2次枝梗粒は、1次枝梗粒に比べて弱勢であり(佐々木ら2008、寺井ら2008)、2次枝梗粒が増加すると、1次枝梗粒が増加した場合に比べて、登熟歩合の低下が著しい(Nagataら2002)。さらに、2次枝梗粒では、1次枝梗粒に比べて、乳白粒と基部未熟粒(杉浦ら2008)、あるいは未熟粒(乳白粒、背白粒、腹白粒、死米)(吉野ら2007)の割合が高まることも知られている。したがって、粒数が増加し、2次枝梗粒数が増加したことは、白未熟粒増加の方向に影響する可能性が高い。それにもかかわらず白未熟粒割合が減少したことから、深水处理ではソース機能が、粒数の増加以上に大きく増加したことが予想される。

そこでソース機能と1穂粒数の関係を調べたところ、穂揃期における、茎の葉身窒素量、葉鞘・稈NSC量および葉面積のそれぞれと1穂粒数の間には正の相関関係(第4図)、すなわち、ソース機能が高いほど、1穂粒数が多いという関係がみられた。このことは、過去に報告されている水稻の1穂粒数は茎のソース機能に応じて決定されていること(石井・玖村1988、丹野1992、金ら2006)と一致する。そこで、ソース機能に関して詳細に解析したところ、籾に対するソース機能は、水管理により異なっていた。すなわち、主茎同士、最上位1次分げつ同士で比べた際、深水区では慣行区に比べて、ソース機能と1穂粒数がともに増加していたが、その回帰直線の傾きは小さくなっており、同程度の1穂粒数の増加のために、より高いソース機能の向上が必要であった(第4図)。このことは、深水区では1

穂粒数の増加に対して、ソース機能の向上が上回ることを示している。この籾あたりのソース機能の向上が、深水处理において白未熟粒の発生が減少した主要因であると考えられる。

このように、深水区と慣行区の間でソース機能の増加に対する1穂粒数の増加率が異なる原因については、ソース機能にかかわる形質調査のために本研究で行ったサンプリング時期が、1穂粒数の決定時期よりも後になったことが関係すると推察される。水稻の分化穎花数は、主に穂首分化期から穎花分化始期の窒素栄養状態の影響を受けるとされている(松島1959)。Oheら(2010)は、栽植密度が異なる水稻を深水处理して、幼穂分化期に相当する深水处理終了時の稲体の窒素量と1穂粒数を測定し、茎あたり窒素量が増えて、1穂粒数も増加するとしている。しかし、この論文の表から本試験と同じ栽植密度のデータを用いて計算すると、幼穂分化期には、深水处理による籾あたり窒素量の増加はみられない。このことは、深水处理直後では、茎あたりのソース機能が増加しても、それに応じて分化する穎花が増えるため、籾あたりのソース機能は増加しないことを示している。しかし、深水处理では、窒素吸収とそれに伴う乾物の増加は、慣行栽培に比べて遅れることが知られていることから(錦ら1988)、本研究では、登熟に関係するソース機能を評価するためには、Oheら(2010)よりも遅い穂揃期の方が適期であると考え、この時期にサンプリングを行った。その結果、籾あたりでもソース機能が向上していることが確かめられた(第2表)。このことから、深水区では分化穎花数が決定した以降もソース機能は増加し続け、穂揃期には、その増加は慣行区に比べて顕著になるため、粒数に比べてソース機能が高まったと考えられる。

深水处理による白未熟粒割合の減少は、茎のソース機能の増加によって説明できたが、茎の次数による白未熟粒割合の違いをソース機能のみでは説明できない場合があった。たとえば、初星の慣行区の2次分げつや2007年の最上位1次分げつでは、主茎に比べて葉身窒素量やNSC量が低く(第2表)、ソース機能が増加したとは考えにくいにもかかわらず、白未熟粒割合は主茎よりも低い傾向があった(第1表)。その要因として、いくつかの可能性が考えられる。その1つは、炭水化物が、母茎から分げつへ転流した可能性である。しかし、出穂期頃には、分げつは母茎から栄養的に独立し、ほとんど転流しない(中村1963、石井・玖村1987)ことが知られており、この可能性は低いと考えられる。第2の要因として、初星慣行区の2次分げつでは、葉面積はむしろ増加していることである(第2表)。そのため、穂揃期に貯まっていたNSC量は少ないけれども、出穂後に生産される光合成産物量は多かった可能性がある。ただし、これは2007年の最上位1次分げつには当てはまらない。第3の要因として、2次分げつでは出穂が遅れるため、気象条件が改善された可能性がある。



しかし、分げつ毎の出穂日を調査していないため、詳細は不明である。また、茎のソース機能と白未熟粒発生が一致しない第4の要因として、1穂粒数の増加が関係している可能性が考えられる。初星慣行区では、1穂粒数が増えると白未熟粒割合も増加する傾向が認められ(第2図)、また、1穂粒数が増えると2次枝梗粒割合が増える関係がある(第3図)ことから、主茎では、2次枝梗粒も増えていると推察される。前述のように、2次枝梗粒の白未熟粒割合は1次枝梗粒に比べて高い(吉野ら2007, 杉浦ら2008)ため、初星の主茎のように穂全体としては十分なソース供給があるようにみえても、1穂粒数が増加して2次枝梗粒割合が増加すると、弱勢な2次枝梗粒には十分な炭水化物が供給されず、白未熟粒の割合が増加することが起こり得ると考えられる。

なお、本試験では粒厚1.8 mm以上の玄米について、白未熟粒割合を測定しているため、登熟の悪い米粒を除いたことが、深水区の白未熟粒割合を低下させたり、1穂粒数が多い穂での白未熟粒割合を増加させている可能性がある。しかし、深水区では登熟歩合が増加するため(千葉ら2011b)、篩選で脱落する粒は減少する可能性が高く、白未熟粒を多く取り除いたために深水区の白未熟粒が減少したとは考えにくい。また、1穂粒数が多い穂では、脱落した粒厚1.8 mm未満の粒の増加は白未熟粒割合を低下させる可能性が高く、初星の慣行区内で1穂粒数が多いほど白未熟粒割合が高まっている傾向は、粒厚1.8 mm未満の玄米を除いた影響とは考えにくい。

以上より、深水栽培では、弱勢茎が減少するだけでなく、株を構成する弱勢および強勢な茎のいずれにおいても、粒あたりのソース機能が増加し、この効果によって、品質が低下しやすい2次枝梗粒割合が増加しても、白未熟粒の発生が抑制されると考えられる。

謝辞: 本研究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、栗崎利幸氏には圃場管理にご尽力頂いた。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。

## 引用文献

- 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 2011a. 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.
- 千葉雅大・松村修・寺尾富夫・高橋能彦・渡邊肇 2011b. 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. 日作紀 80: 312-325.
- Hayashi M., K. Sugiura, C. Kuno, I. Endo, Y. Tanaka and A. Yamauchi 2011. Reduction of rice chalky grain by deep and permanent irrigation method; Effect on growth and grain quality of rice. Plant Prod. Sci. 14

: 282-290.

- 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.
- 石井康之・玖村敦彦 1987. 水稻の幼穂発育過程の生理学的研究 第5報 茎別にみた幼穂分化期および幼穂発育期の光条件と乾物生長経過. 日作紀 56(別2): 15-16.
- 石井康之・玖村敦彦 1988. 個々の葉のシンクとソースの発育に着目してみた水稻の収量形成過程. 第1報 “茎の強勢度”とシンクおよびシンク/ソース比の成立過程の特徴. 日作紀 57(別2): 146-156.
- 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.
- 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.
- 小谷俊之・松村洋一・黒田晃 2005. 早生品種「ゆめみづほ」における登熟期間の茎葉非構造化炭水化物含量と乳白粒発生との関係. 日作紀 74(別1): 116-117.
- 近藤始彦・桑形恒男・石郷岡康史・鳥谷均・長谷川利弘・笹原香奈子・石丸努・三王裕見子 2007. 水稻作況標準データを用いた乳白粒と基部未熟粒発生の気象要因の解析. 日作紀 76(別1): 210-211.
- 金和裕・金田吉弘・柴田智・佐藤馨・三浦恒子・佐藤敦 2006. 水稻群落における次位・節位別分げつの1穂精玄米重と葉面積および葉面積あたりの葉身窒素量の垂直分布との関係. 日作紀 75: 191-196.
- 松島省三 1959. 稲作の理論と技術. 養賢堂, 東京. 1-302.
- Nagata K., Y. Fukuta, H. Shimizu, T. Yagi and T. Terao 2002. Quantitative trait loci for sink size and ripening traits in rice (*Oryza sativa* L.). Breed. Sci. 51: 53-56.
- 中村公則 1963. 水稻分げつの独立性並びに無効分げつに関する生理的研究. 東北農試研報 28: 53-141.
- 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.
- Ohe M., O. Okita, and H. Daimon 2010. Effects of deep-flooding irrigation on growth, canopy structure and panicle weight yield under different planting patterns in rice. Plant Prod. Sci. 13: 193-198.
- 大西政夫・堀江武 1999. 重量法による水稻各器官中の非構造化炭水化物の簡易定量法. 日作紀 68: 126-136.
- 佐々木良治・大平陽一・武田博之 2008. 水稻品種コシヒカリと初星における穂上位置による粒重増加の差異と高温の影響. 日作紀 77(別1): 142-143.
- 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.
- 菅井恵介・後藤雄佐・斎藤満保・西山岩男 1999. 段階的な水位上昇処理が水稻の茎数増加に及ぼす影響. 日作紀 68: 390-395.
- 杉浦和彦・井上勝弘・野々山利博・林元樹 2008. 全量基肥肥料による「コシヒカリ」の白未熟粒発生抑制. 愛知農総試研報 40: 99-105.
- 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.
- 丹野文雄 1992. 水稻の栄養診断と予測技術に関する研究 第7報 コシヒカリ, ササニシキの分げつの子実生産力と養分吸収特性. 福島農試研報 31: 1-8.
- 田代亨・江幡守衛 1975. 腹白米に関する研究 第4報 白色不透明部

- の胚乳細胞の形態的特徴. 日作紀44 : 205-214.
- 寺井謙次・眞崎聡・川本朋彦・松本眞一・小玉郁子・山下清次 2008. イネ穎果の登熟と穂上位置及び開花時期との関係. 日作紀 77 : 191-197.
- 若松謙一・田之頭拓・小牧省三・東孝行 2005. 暖地における水稲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. 水稲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.
- 吉野裕一・太田和也・在原克之・小川豊 2007. 穂肥の施用が水稲の玄米外観品質と食味に及ぼす影響. 千葉農総研研報 6 : 95-102.

**Deep-Flood Irrigation Suppresses the Occurrence of Chalky Grains through High Source Ability, in Spite of the High Percentage of Secondary Rachis Grains** : Masahiro CHIBA<sup>1, 2)</sup>, Osamu MATSUMURA<sup>1)</sup>, Hajime WATANABE<sup>2)</sup>, Yoshihiko TAKAHASHI<sup>2)</sup> and Tomio TERAO<sup>1)</sup> (<sup>1)</sup>*Natl. Agric. Res. Center, Joetsu, Niigata 943-0193, Japan;* <sup>2)</sup>*Grad. School of Sci. & Tech., Niigata Univ.*)

**Abstract** : We previously reported that deep-flood irrigation (DFI) is effective in reducing the occurrence of chalky grains compared to conventional water irrigation (CWI), which seems to be achieved by the suppression of inferior tillers. To investigate how the difference in tiller composition under DFI suppresses the occurrence of chalky grains, we examined the number of grains per panicle as well as factors related to source ability (nonstructural carbohydrate of leaf sheath and culm at full heading stage, nitrogen of leaf blade at full heading stage, and the leaf area at ripening stage) between superior main stem and inferior tillers including highest primary tiller and, in CWI, secondary tillers. Under DFI, the source ability per grain was increased not only in the superior main stem but also in the highest primary tiller, and hence chalky grains in both shoots were decreased. The results show that DFI increases source ability per grain in all stems and decreases chalky grains, regardless of superiority in stems. Moreover, the occurrence of chalky grains was suppressed, in spite of the higher number of grains per panicle with higher percentage of secondary rachis grains.

**Key words** : Chalky grain, Deep-flood irrigation, Number of grains per panicle, Rice, Secondary rachis grains, Source ability, Tiller.

---