水稲の深水無落水栽培による白未熟粒の発生抑制とその機構解明

名古屋大学大学院生命農学研究科
生物圏資源学専攻
循環資源学講座
循環資源学研究分野

林　元樹

2011 年 3 月

目　次

第一章　緒　　論　・・・・・・・・・・　1

第二章　深水無落水栽培が水稲の玄米外観品質に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・・・・・　12

2.1　緒　　言　・・・・・・・・・　13

2.2　材料と方法　・・・・・・・・・　15

2.3　結　　果　・・・・・・・・・　17

2.4　考　　察　・・・・・・・・・　19

2.5　要　　旨　・・・・・・・・・　24

図　　表　・・・・・・・・・　25

第三章　深水無落水栽培が白未熟粒の発生を抑制する機構の解明　・・・・・・・・・・・・　35

3.1　緒　　言　・・・・・・・・・　36

3.2　材料と方法　・・・・・・・・・　37

3.3　結　　果　・・・・・・・・　39
3.4　考　　察　・・・・・・・・　41
3.5　要　　旨　・・・・・・・・　44
　　図　　表　・・・・・・・・　46

第四章　登熟期間の高温が水稲の炭素転流に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・・・・・・　55
4.1　緒　　言　・・・・・・・　56
4.2　材料と方法　・・・・・・・　57
4.3　結果と考察　・・・・・・・　58
4.4　要　　旨　・・・・・・・　61
　　図　　表　・・・・・・・　63

第五章　総合考察と結論　・・・・　70

引用文献　・・・・・・・・・・・　80
謝　　辞　・・・・・・・・・・・　101
報文目録　・・・・・・・・・・・　104

第一章

緒論

多くの国において,玄米外観品質(以下,外観品質と略する.)は商品価値に大きな影響を与える形質であり,向上させることがイネ研究における重要な課題となっている(He ら 1999,Tan ら 2000,Adu-Kwarteng ら 2003,Patidol と Wang 2003,Cheng ら 2003,Lin ら 2005,Toojinda ら 2005,Wan ら 2005,Zhong ら 2005,Cheng ら 2007,Yang ら 2007,Yoshida ら 2007,Cooper ら 2008,Ahmad ら 2009,Fitzgerald と Resurreccion 2009,Ishimaru ら 2009,Nagarajan ら 2010).外観品質を低下させる主な要因として,白未熟粒(chalky grain)の発生がある(He ら 1999,Tan ら 2000,Adu-Kwarteng ら 2003,Patindol と Wang 2003,Cheng ら 2005,Wan ら 2005,Fitzgerald と Resurreccion 2009,Ishimaru ら 2009).白未熟粒は,玄米の白濁する位置により,心白粒,乳白粒,基白粒,背白粒,腹白粒に区別される(長戸と江幡 1965,Tashiro と Wardlaw 1991)が,とくに近年,発生が多くなっており問題視されている(Patindol と Wang 2003,Lin ら 2005,河津ら 2007,若松ら 2007,Tsukaguchi と Iida 2008,Lin ら 2010).白未熟粒のうち,乳白粒,基白粒,背白粒は,登熟期間に高温(平均気温が 27 ℃以上)に遭遇すると発生することが知られている(若松ら 2007).さらに,IPCC (2007)は,世界的に近年(1995～2006 年)の平均気温は過去測定されている年限内(1850 年代から)で最も高いこと,平均気温は今後も上昇する可能性が高いことを報告している.これらのことは,今後,登熟期間の高温に起因する白未熟粒の発生抑制に向けた技術開発が,水稲の重要な研究課題となることを示している.実際に,愛知県(以下,本県と略する.) でも,2000 年台初頭から外観品質によって決められる検査等級が低下している.

本研究では,新たな白未熟粒抑制技術として,深水かんがいと不耕起V溝直播栽培を組み合わせた「深水無落水栽培」が有効であることを証明するとともに,その抑制効果の機構を明らかにしようとした.さらに,炭素の安定同位体(^{13}C)を用いて,登熟期の高温が光合成産物の転流に与える影響を検討し,白未熟粒の発生要因について明らかにしようとした.

前述したとおり,世界的に白未熟粒の発生は深刻な問題となっており,関連する研究が行われている.Heら(1999),Tanら(2000)は日印亜種間雑種を,Wanら(2005)は「あそみのり」と「IR24」の染色体断片置換系統群(CSSLs)を,Toojindaら(2005)は東南アジアで栽培されている品種を,Kepiroら(2008)はjaponica亜種の内,長粒品種を材料としたQTL(量的形質遺伝子座)解析を行い,白未熟粒に関連する遺伝子座を同定している.また,Pengら(2009)によれば,中国では既に外観品質向上を目標とした育種が行われ始めている.

一方,白未熟粒発生に至るメカニズムの解明に関する研究は,多岐にわたっている.環境要因について,Cooperら(2008)は,高夜温,特に26 ℃より高い夜温により白未熟粒の発生が助長されること,品種によりその程度は異なることを報告している.Chengら(2003)は,節水栽培が,水稲,特に外観品質が良好な品種において白未熟粒の発生を助長することを報告し,水管理が白未熟粒の発生に影響を与えるとしている.Yangら(2007)は,CO_2濃度が制御できる圃場実験(FACE:Free-Air CO_2 Enrichment)で,高CO_2濃度が白未熟粒の発生を促進することを見出した.また,窒素施用量を変えた試験結果から,増肥により発生が抑制されることを報告している(Yangら 2007).さらに,生

化学的な観点から,Lin ら（ 2010 ）は異なる登熟気温が玄米中の蛋白質組成に及ぼす影響を検討し,高温条件により構造蛋白質の一つであるプロラミンが増加する一方,アミロース含量が減少することにより,白未熟粒の発生が増加することを示している.Lin ら（ 2005 ）は玄米中に含まれる蛋白質を全て分析するプロテオミクスにより,登熟期の高温が白未熟粒の発生を促進する過程を明らかにしようとしている.しかし,プロテオミクスは,最近提唱された手法であり,有用な情報を得るにはまだ研究の蓄積が必要である.また形態学的な手法によって,Zakaria ら（ 2002 ）は,登熟期の高温により,アミロプラストのサイズが小さくなることを示し,デンプン分解に関わるα-アミラーゼ酵素が高温により活性化することとの関連性を示唆している.She ら（ 2010 ）は,水稲品種「金南風」の変異体の内,数種のデンプン合成酵素を制御する遺伝子を持たない *flo2* について検討し,高温条件に遭遇すると正常の金南風に比較して白未熟粒が多く発生することから,高温時に頴果内でのデンプン合成酵素の欠如が白未熟粒の発生に影響を与えることを示唆している.さらに,Patindol と Wang（ 2003 ）,Cheng ら（ 2005 ）,Zhong ら（ 2005 ）は,整粒のデンプン組成と比較すると白未熟粒で長鎖のアミロースが減少すること,インディカ品種では白未熟粒が発生すると食感が固くなり食味が低下することを報告している.他にも,剪葉や剪穂（ Wang ら 2007 ）や,穂の着生位置（ Cheng ら 2007 ）等,シンクーソースバランスに注目した研究がある.

以上のように海外での研究は,白未熟粒に関する遺伝子解析や要因解析がほとんどで,栽培方法による対応策は窒素施肥法（ Cheng ら 2005,Ahmad ら 2009 ）や水管理法（ Cheng ら 2005 ）に関する報告が幾つかあるのみである.

一方,日本では,1950年代から1960年代前半にかけて,全国的に外観品質の低下が問題視され(長戸と江幡 1965),多くの研究が蓄積されてきた.その結果,登熟期の気温が高くなると白未熟粒(背白粒,基白粒,乳白粒)が多発すること(長戸と江幡 1965),品種や穂内における籾の着生位置により発生程度が異なること(長戸と江幡 1965,岩下ら 1973,安庭ら 1978)が判明している.さらに,1980 年代後半から,夏季の高温に起因する外観品質低下について,研究が多く行われるようになった(田中と真鍋 1989,星ら 1996,舩場ら 1997,寺島ら 2001,和田ら 2002,岩渕ら 2003,表野ら 2003b,高田ら 2007,Okada ら 2009,杉浦ら 2010,藪押ら 2010).

なお,ここで日本における外観品質の等級分けについて述べる(食糧庁検査課 2004).等級分けは,検査標準品との達観比較により行われる.検査は,それぞれの等級における整粒(障害が無い玄米粒)の最低割合により決定される.例えば,一等では整粒歩合が 70%以上であることとされており,これを下回ると二等(60%以上),三等(45%以上),等外(45%以下)となる.整粒歩合以外に分類される玄米粒として,被害粒,死米,着色粒,未熟粒がある.本研究で対象としている白未熟粒は,未熟粒に分類される.生産者価格は等級により決まるため,未熟粒の発生による等級低下は,農家の収入に直接影響を与える.

Tashiro と Wardlaw (1991)は,出穂 7 日目から成熟期までの気温を段階的に変えた実験結果から,障害粒の種類により発生する障害粒が異なること,特に平均気温が 27 ℃～30 ℃で背白粒,33 ℃で乳白粒が多く発生することを示した.森田 (2005)と岩松ら (2007)は,出穂後 20 日間の平均気温が 27 ℃

を超えると白未熟粒の発生が急激に多くなることを見出した.また,寺島ら(2001)はコシヒカリで27℃,岩渕ら(2003)は夢つくしで28℃を越えると一等米比率が低下することを報告した.これらの結果から,出穂後20日間の平均気温が27℃以上になると,白未熟粒の発生が助長されることが判る.なお,佐藤と稲葉(1973)と森田ら(2004)は,器官別に温度条件を変える実験結果から,穂が高温に遭遇すると白未熟粒が発生することを示した.他にも,登熟期間に,日照時間が短い場合(宮野と国分 2009,高田ら 2010a,藪押ら 2010),高い日射量や高湿度(若松ら 2009),フェーン等の強風(大谷と吉田 2008,坂田ら 2008,藪押ら 2010)等の気象条件により,白未熟粒の発生が増加することがわかっている.かんがい水の温度(重山ら 1999,荒井と伊藤 2001,坪根ら 2008)や,出穂前の高い地温(37℃,Arai-Sanohら 2010)によっても白未熟粒の発生は影響を受ける.また,近年,玄米蛋白質の増加による食味低下を避けるための過度な肥料施用量減(近藤 2006,松村 2005,2007,黒木ら 2009,月森 2009)や,転作等による地力の消耗(松村 2005,2007),作土深の減少(松村 2008),早期の落水(中村ら 2003,金田ら 2004,南雲ら 2010),過度の「中干し」に起因する土壌亀裂(金田ら 2008)により,白未熟粒発生は増加することが指摘されている.

高温条件により,白未熟粒が発生する機構についても多岐にわたる研究が行われている.玄米の白濁部分はアミロプラストが小さくなっていること(TashiroとWardlaw 1991),その結果,透過光が乱反射するため白濁しているように見えること(田代と江幡 1975)から,高温により胚乳へのデンプン蓄積が不良となることが白未熟粒の発生要因であると考えられる.なお,デン

プンの蓄積が不良となる原因として,玄米でのデンプン合成能や糖の輸送能力(シンク能)と茎葉での同化産物供給能(ソース能)が考えられる(近藤 2006,森田 2008).シンク能について,佐藤と稲葉 (1973),森田ら (2004) は高温により玄米におけるデンプン合成能や糖の転流能が低下することを,小葉田ら (2004)は登熟時における玄米の急激な生長に対し茎葉からの供給が間に合わないことを,デンプンの蓄積が不良となる原因として挙げている.一方ソース能については,30 ℃前後の条件では,見かけの光合成速度が低下すること(Yamada ら 1955,Vong と Murata 1977,Oh-e ら 2007),葉や枝梗の切除(Tsukaguchi と Iida 2006,永畠ら 2006,中川ら 2006)により白未熟粒,特に乳白粒の発生量が増加することが示されている.これらのことから,白未熟粒は,シンクーソース能のアンバランスにより発生することが考えられる.

さらに,白未熟粒の種類毎に発生要因が異なることが知られている.前述したとおり,登熟期に遭遇する温度によっても異なるが,時期によっても発生する種類が変動する(Tashiro と Wardlaw 1991).Tashiro と Wardlaw (1991) は,出穂後4～20日頃の高温条件により乳白粒が,出穂後16～24日頃の高温条件により背白粒が発生することを報告した.ここで彼らは,温度処理を昼間 36 ℃,夜間 31 ℃としているが,現地での実態調査や作期を変動させた試験では,背白粒は出穂後10日前後から20日の間の高温条件により発生が助長されるとの報告が多い(高橋 2007,若松ら 2007).近年,温暖地の高温年において発生が多く報告されており(岩渕ら 2003,表野ら 2003b,若松ら 2007),本県でも同様の傾向が認められている(杉浦ら 2010).一方,乳白粒の発生は,籾数との関係が指摘されており,籾数が過剰となると発生割合が増加する

(高橋 2007).穂内での着生位置についても調査が行なわれており,二次枝梗や穂元に近い位置の頴果での発生が多い(高橋 2007).木戸と梁取(1968),Nagato と Chaudhry (1969)は,穂内の強勢花,弱勢花の発育過程に重複する時期が認められること,これによりデンプンの供給が不足することが,乳白粒発生の原因になっている可能性を指摘した.荒井と河野 (1978)は,籾を除去する実験の結果から,「間引き」を行なうことで,弱勢花の稔実歩合が向上することを示し,このことは木戸と梁取 (1968)の指摘を裏付けると考えられる.さらに,Umemoto ら (1994)は,着生位置,特に弱勢花でデンプン合成酵素の活性が低いことを認めた.これらから,乳白粒の発生は籾へのデンプン蓄積の不足により発生すると考えられる.

次に,白未熟粒発生抑制技術の開発状況について述べる.以前から,外観品質向上方法として,幼穂形成期以降に窒素成分を多く施用する方法が提唱されている(井手ら 1971,山本ら 1985).よって,幼穂形成期以降の施肥量や施用時期の検討や(高橋 2004,坂田ら 2005,坂田と高田 2006,野村ら 2004,吉野ら 2007,及川ら 2008,若松ら 2008,高田ら 2010),被覆尿素肥料等新たな資材の検討(坂田と高田 2006,坂田ら 2008,杉浦ら 2008)が行われている.いずれの報告も,慣行法に比較して生育後半に水稲の葉色や窒素濃度を上げることで,外観品質の向上が可能であるとしている.

水管理法として,水温低下により外観品質低下を抑制することを目的とする掛け流し(荒井と伊藤 2001,中村ら 2003,坂田ら 2005),かんがい水深を深くする深水かんがい(佐藤ら 2004,千葉ら 2008,2009)がある.過去の試験結果から,深水処理により水稲の葉色は濃く維持されることが判明してい

る(桐山と中谷 1987,錦ら 1987,古谷ら 1991).さらに,桐山と中谷(1987)は,深水処理により植物体窒素濃度が高く維持されることを報告し,Won ら(1999)と佐藤ら (2004)は,その要因として深水処理による無効分げつの抑制を示唆した.Ohe ら (2010)は施肥量あたりの生産量が向上することから,千葉ら (2011)は穂揃い期の葉身窒素濃度が高いことから,深水処理により光合成機能が向上する可能性を示唆しており,千葉ら (2011)は,このことが白未熟粒の発生を抑制する要因としている.

その他にも,登熟期間が高温となる時期と重ならないように作期を移動する技術(森田 2000,山口ら 2003,松村 2005,宮崎ら 2008,守田ら 2009)や,籾数制限を目的とした栽植密度の調整(高橋 2004)等による発生抑制を目指した技術開発が行われている.

品種改良による,高温障害回避に向けた取り組みも行われている.遺伝資源の探索及び育成系統の選抜を行うための検定法として,人工気象室(表野ら 2003a,2004,山川と神田 2003),温室(飯田ら 2002,田畑ら 2005),ほ場内に設置した簡易ビニルハウス(小牧ら 2003,永畠と黒田 2004),作期変動(小牧ら 2000,西村ら 2000,若松ら 2007),温水掛け流し(重山ら 1999,石崎 2006),温度勾配ビニルハウス(永畠と山元 2005)等が検討されているが,それぞれの手法が長所短所を有するため,統一した評価法は確立されていない.ただし,一連の試験の中で,品種間差異が認められており,それぞれの検定法特有ではあるものの基準品種が選定されている(小牧ら 2000,2002,山川と神田 2003,石崎 2006,若松ら 2007).その結果,高温による外観品質低下について系譜による検討や,統計遺伝学的検討が行われている(西村ら 2000,

田畑ら 2005,若松ら 2007,佐々木ら 2008).さらに,育種効率の向上のため,DNA マーカーの作成が進められている.QTL 解析も進められており(寺尾ら 2004,Nakagawa ら 2005,蛯谷ら 2008,永畠ら 2009),今後さらに研究が推し進められると考えられる.なお,既に「ふさおとめ」(渡部ら 1998),「こしいぶき」(星ら 2002),「てんたかく」(山口ら 2006)等,生産現場に普及している品種が幾つかある.

以上のように,白未熟粒の発生機構やそれを抑制する技術開発に関する研究は蓄積されてきたが,前者が後者に有機的に結びつく段階には至っていない.さらに,農業技術は,営農現場に普及することで初めて目的が達成される.営農現場に適用する技術とするためには,必須条件として,①新たにコストがかからないこと,②労力が増加しないこと,が必須条件である.本研究ではこの点にも十分に注意を払った.

なお,日本では,かんがい水にかかる経費は,使用期間で料金を弁済する方式をとっているので,水管理による白未熟粒抑制手法は,新たなコストが生じない.本研究では,その中で,たん水深のみを制御すればよく,現場農家でも比較的容易に取り組むことが可能と考えられる「深水かんがい」に注目した.この,深水かんがいを,省力的な栽培方法である直播栽培と組合すことが可能ならば,さらに生産現場への普及が期待できる栽培方法となり得ると考えた.

濱田ら (2008)は,本県で開発した不耕起 V 溝直播栽培(以下,V 溝直播と略する,濱田ら 2007)の入水時から成熟期まで連続して 20 cm 程度のたん水深を保つ「深水無落水栽培」を提唱した.そこで本研究では,「深水かんがい」と「不耕起 V 溝直播栽培」とを組み合わせた「深水無落水栽培」について,

白未熟粒の発生抑制方法としての有効性を第二章で,またその効果発生要因を第三章で検討した.また第四章では,白未熟粒の発生要因について,白未熟粒の発生はシンクーソースのアンバランスにより発生すること,特に高温条件により穂への転流が影響を受けるとの仮説をたて,白未熟粒の発生が多い初星とコシヒカリを対象とし炭素の安定同位体(^{13}C)を供与し動態を調査することで,この仮説を証明しようとした.

以上を踏まえて,本研究では,白未熟粒抑制技術として,深水かんがいと不耕起V溝直播栽培を組み合わせた「深水無落水栽培」が有効であることを証明するとともに,この白未熟粒の発生を抑制する効果が植物体の窒素含量の増加による光合成活性の向上に起因すること,反対に光合成産物の減少により白未熟粒の発生が促進されることについて明らかにすることを目的とした.

第二章

深水無落水栽培が水稲の
玄米外観品質に及ぼす影響

2.1　緒言

かんがい水深を深くする「深水かんがい」は,障害型冷害への対策として,古くから,寒冷地の水稲栽培で行われてきた(小林と佐竹 1979,佐竹ら 1988)が,1980 年代から,無効分げつの発生を抑える生育制御技術として注目されてきた.大江らの一連の研究から,深水かんがいは,分げつ盛期から最高分げつ期まで行うことで有効茎歩合が向上すること(大江と三本 1998),処理開始時に主茎の展開葉の葉鞘に水位を合わせる適正な方法であれば収量だけでなく耐倒伏性も向上すること(大江と三本 2002),密植栽培でも同様の効果が得られることから湛水土中直播栽培にも適用可能であること(Ohe ら 2010)が判明している.さらに,Won ら (1999)は穂重型の多収品種を用い,深水かんがいと組み合わせることで,直播栽培において無効分げつ抑制による収量増が望めることを示した.ただし,処理時期が合わなかったり長かったりすると,穂数の著しい減退や減収をまねき(錦ら 1987,渡邊ら 2006),耐倒伏性の低下がみられること(大江と三本 1998)が報告されている.なお,営農現場では,一人の農家が多くの筆数ほ場を管理する場合が多く,技術として普及する技術の特徴として,処理に関わる手順が簡単で少ないこと,技術を適用する場合に農家が判断する場面が少ないことを有することが必要である.

V 溝直播は,安定した直播栽培技術として,本県では約 1,500ha の水田に普及しており(2009 年度現在),全国でも青森県を始め 14 府県,約 1,000ha に普及している.V 溝直播は,育苗を必要としないことと,入水から成熟期まで中干し等の水管理を必要としないことから,移植栽培と比較して労働

時間を約3割削減できる(愛知県農業総合試験場　2007).このことは,大規模経営体が農業技術に求める要望に合致しており,生産現場に受け入れられる要因となっている.さらに,V 溝直播は,移植栽培と収量が同等であること,整粒歩合が高く外観品質が良いこと(小出ら 2006)から,省力ばかりでなく安定して高品質な水稲生産が可能な栽培方法と考えられる.

濱田ら(2008)は,世界一の単収を得ている(深井　1990,松島 1998,Australian Bureau of Statistics, 2010)オーストラリアの栽培方法を評価する際に,V 溝直播の入水時から成熟期まで連続して 20cm 程度のたん水深を保つ「深水無落水栽培」を提唱している.彼らは,これにより,無効分げつが減少し肥料効率が増加すると考えられることから施肥量の低減や,生育期間をとおし落水せずたん水を維持できることから水質浄化を含めた水田の多面的機能の活用が,省力的かつ生産性を犠牲にせず実現できるとしている.また,移植栽培では必要な中干しを行わないこと,入水から 20cm 程度のたん水深を成熟期まで保てばよいことから,作業性や水資源の有効活用の面からも,深水かんがいと V 溝直播の親和性は高いとしている.なお,深水無落水栽培は,外観品質を向上させる V 溝直播と深水栽培を組み合わせていることから,省力的な外観品質低下抑制技術になりうると期待されるが,これまでに十分な検討は行われていない.

そこで,本研究ではコシヒカリの 2008 年から 2010 年 3 年間に複数の実験；１つめは,慣行のたん水深(10 cm)と深水かんがい(20 cm)をそれぞれ個別の圃場で,２つめは傾斜水田を用い同一圃場内で,たん水深に対する水稲の反応を検討し,これらの結果から深水無落水栽培が外観品質を向上

させる手法として有効であることと,この効果がたん水深により起因することを明らかにしようとした.

2.2　材料と方法

1.実験材料

品種はコシヒカリを用いた.試験は,愛知県農業総合試験場作物研究部(愛知郡長久手町)で2007年に採取した種子を用い実施した.種子は出芽率向上のため殺菌剤,チウラム水和剤を種子重あたり 0.5 %で粉衣処理し,催芽せずに不耕起V溝直播機(以下,V直播種機と略する)で7 g m^{-2}となるように播種した.なお,使用したV直播種機は,十条播種機で条間は20 cmだった.播種と同時に,播種溝へ市販されている不耕起直播専用肥料(窒素成分のみ.商品名:早生用乾田直播用肥料,LPS80:LP100:LP70を5:2:3の比で配合したもの.愛知県農業協同組合経済連合製.)を窒素成分量で7.8 g m^{-2}施用した.

2.試験1　深水無落水栽培が外観品質に及ぼす影響(2008～2010年)

試験処理として,たん水深が20 cmの区(以下,深水区と称する)と10 cmの区(以下,慣行区と称する)をそれぞれ4反復設定した.

播種等の耕種概要について表1-1に示す.なお,各区のたん水深は入水から落水まで保った.雑草防除のため,播種後出芽前にｸﾞﾘﾎｻｰﾄ液剤を,水稲出芽後の乾田期間にｼﾊﾛﾎｯﾌﾟﾌﾞﾁﾙﾍﾞﾝﾀｿﾞﾝ液剤を,入水後にﾋﾟﾗｿﾞﾚｰﾄ粒剤を散布した.

3.試験 2　段階的なたん水深と水稲の諸形質との関係(2008 年,2010 年)

田面を傾斜させた水田(傾斜度 1/500,高低差 10 cm)で実施した.2008 年では,たん水深が,20 cm(以下 20 cm 区と称する),15cm(同 15 cm 区),10 cm(同 10 cm 区)を,2010 年は 20 cm(以下 20 cm 区と称する),16 cm(同 16 cm 区),12 cm(同 12 cm 区) ,8 cm(同 8 cm 区)でそれぞれ 3 反復設定した.

耕種概要を,表 1-1 に示した.除草剤として,出芽前にｸﾞﾘﾎｻｰﾄ液剤を,出芽後の乾田期間にｼﾊﾛﾎｯﾌﾟﾌﾞﾁﾙ液剤とﾊﾛｽﾙﾌﾛﾝﾒﾁﾙ液剤を散布した.入水後,設定した水深を落水まで保った.

4.生育と収量調査

出芽数の調査は入水までの間に実施した.生育調査は,入水後 1 か月,最高分げつ期,幼穂形成期に草丈,茎数,葉色を測定した.葉色については,葉緑素計(SPAD502,ミノルタ(現コニカミノルタ)社製)を用い,最上位展開葉から 2 葉目を測定した.

成熟期に稈長,穂長,穂数を計測した.各区,4 条×2 m (1.6 ㎡)を刈り取り,風乾したものを収量調査のサンプルとした.サンプルは脱穀,籾摺りを行った後 1.85 mm の回転篩で選別し秤量した.秤量時に玄米水分率を計測し,含水率 14.5 %に換算した.

別途,1 条×50 cm から植物体を刈り取り,収量構成要素(籾数,登熟歩合,千粒重)計測用サンプルとした.なお,登熟歩合は全籾数を 1.85 mm の篩で

選別した玄米数を全籾数で除した値,千粒重は1.85 mmの篩で選別した玄米を水分率 14.5 %に換算した値を用いた.

5.品質調査

収量調査サンプルの一部を 1.80 mm の篩で選別し,穀粒判別機(RGQ110,サタケ製)で計測した.数値は,調査した全粒数に対する整粒と各障害粒との比で表示した.

2.3 結果

1.出穂期と出穂後 20 日間の平均気温

出穂期及び出穂後20日間の平均気温を表1-2に示す.全ての試験で,出穂期は 8 月 2 日から 8 月 4 日の間だった.

試験 1 の2009年を除外すると,いずれの試験でも出穂後20日間の平均気温が 27℃を上回った.

2.試験 1 深水無落水栽培が外観品質に及ぼす影響

3 年間をとおし,深水区は慣行区に比較して,整粒歩合が有意に高く,基部未熟粒数比は有意に低かった(表 1-3).

2008年では,深水区の草丈は,入水 1 ヵ月後から慣行区より有意に高かった(図 1-1).その後,この傾向は生育期間全体でみられた.茎数では,深水区が慣行区に比較して少なく推移した(図 1-2).特に,最高分げつ期(6 月27日調査)に2区間の差がもっとも大きかった.葉色では,深水区が慣行

区と比較して濃く推移した(図 1-3).

草丈,茎数,葉色の傾向は,2009 年と 2010 年でも同様であった(データ省略).

3 年間をとおし,成熟期に,深水区は慣行区と比較して,稈長では有意に長く,穂数では少なかった(表 1-4).穂長では,両区間に差が認められなかった.倒伏は両区とも発生しなかった.

精玄米重では,両区間に差が認められなかった(表 1-4).千粒重,登熟歩合及び単位面積(㎡)あたり籾数は,両区とも同程度だった.一穂あたり籾数は深水区の方が有意に多かった.

3.試験 2　段階的なたん水深と水稲の諸形質との関係

2008 年において,整粒歩合では,20 cm 区が最も高かった(表 1-5).障害粒のうち,基部未熟粒の比率は 20 cm 区で最も小さかった.整粒歩合と基部未熟粒にみられたこの傾向は,2010 年にもみられた.乳白粒の発生率には,水深の影響は有意でなかった.

2008 年において,稈長は,草丈の推移と同様に,10 cm 区,15 cm 区,20 cm 区の順に高かった(表 1-6).穂長は,有意差は認められないものの,20 cm 区で最も長く 10cm 区で最も短かった.穂数は,10 cm 区,15 cm 区,20 cm 区の順に少なかった.全ての試験区で倒伏は認められなかった.この傾向は,2010 年でも認められた.

2008 年において,精玄米重について,試験区間で有意な差は認められなかった(表 1-6).収量構成要素について検討すると,千粒重,登熟歩合及び

㎡あたり籾数では,区間に有意差は無かった.一方,一穂あたり籾数では 20 cm 区が最も多く,15 cm 区,10 cm 区の順に有意に少なかった.2010 年では,試験区間で収量や収量構成要素に関し有意な差は認められなかった.

2.4 考察

深水無落水栽培は,不耕起 V 溝直栽培と深水かんがいを組み合わせた栽培法で,管理は水位を 20cm で維持するのみであるため容易である(濱田ら 2008).本試験は,深水無落水栽培が,複数年,複数試験系で安定して白未熟粒の発生を抑制することを明らかにした.このことから,深水無落水栽培は安定した白未熟粒抑制法であると結論付けた.

1.試験 1　深水無落水栽培が外観品質に及ぼす影響

外観品質について,深水区では整粒歩合が増加し,基部未熟粒の割合が低下した.若松ら(2007)は,登熟期の高気温が障害粒のうち,背白粒と基白粒の発生に影響を与えると報告している.すなわち,水稲の登熟期間が高温になる温暖地では,背白粒と基白粒の発生を抑えることが,外観品質低下に対する対応策として重要であることを示している.本研究では,背白粒と基白粒が含まれる基部未熟粒の割合が低下したことから,深水無落水栽培は夏季の高温条件下で外観品質を向上させることが明らかになった.

千葉ら(2009)は,移植栽培を前提とした深水栽培により,白未熟粒の発生が減少することを報告した.彼らは,白未熟粒の内,特に乳白粒の発生が少なくなることを見出した.本研究から,V 溝直播を前提とした深水無落水

栽培は,減少する白未熟粒の種類は違うものの発生率を減少させることが判明した.V溝直播は,慣行移植栽培に比較して,労働時間が3割程度減少する(愛知県農業総合試験場 2003).このことから,深水無落水栽培は,省力も達成できる白未熟粒の発生抑制方法であると結論づけた.

深水区では,慣行区に比較して生育当初から草丈が長く,茎数は少なく推移した.大江ら(1994)は,たん水深を深くすることで草丈が伸び,茎数が少なくなるとしている.この報告は水稲品種ササニシキを供試しポットを使用した移植栽培の結果だったが,本研究から,コシヒカリでV溝直播の栽培条件でも,水稲の生育はたん水深により同様の影響を受けることが判明した.

なお,大江と三本(1998)は長い期間にわたる深水処理により,耐倒伏性が減少することを報告している.今回の研究では,V 溝直播栽培の入水時(３葉期)から成熟期まで深水処理を継続したが,倒伏は認められなかった.濱田(2004)は,V溝直播で栽培した水稲は耐倒伏性が高いことを示し,その主要因として通常の直播栽培と比較して播種深が深い(5cm)ことを示唆した.深水かんがいを継続した深水無落水栽培で倒伏が認められなかった要因として,基盤である V 溝直播栽培優位性を反映していると考えられた.

収量では,濱田ら(2008)の結果と同様に深水区と慣行区間では差が認められなかった.収量構成要素を比較すると,深水区では穂数が少ないものの一穂もみ数が増加しており,これが収量に差が無かった要因であった.一般に,一穂もみ数が増加すると登塾歩合が低下する場合が多いが,本研究では

一穂籾数と登熟歩合のトレードオフは認められなかった.これは,深水処理によって,一穂当たりの全乾物生産量が増加することを示している.大江・三本(1999)は深水処理により,主茎の乾物増加速度が向上することを見出した.V 溝直播は,移植栽培に比較して一穂粒数に依存する栽培法であることから(小出ら 1997),穂数を抑制する深水栽培による欠点をカバーできると考えられた.

2.試験 2　段階的なたん水深と水稲の諸形質との関係

傾斜水田で検討した結果,前述した深水無落水栽培の特徴は,水深が深くなるほど顕著であった.すなわち,水深が深い区ほど草丈は高く,茎数は少なかった.大江ら(1994)は,栄養生長期に深水条件下によって,葉身の伸長が促進させ,分げつ芽の分化生長が抑制されたと報告し,本研究の結果と一致した.

外観品質についてみると,水深が深くなるほど整粒歩合が向上した.また,生育期間の葉色が濃かったことから,たん水深の深い区ほど植物体の窒素濃度が高く維持されていたと考えられる.このことが,外観品質向上に貢献したと考えられるが,実際に植物体の窒素濃度を測定し確かめる必要がある.

3.深水無落水栽培の有効性

登熟期間の高温条件が外観品質を低下させるメカニズムは,まだ十分に解明されていない.ただし,一部ではあるが登熟期の高温による植物体のシ

ンク能とソース能のアンバランスが主因であることは判明している(近藤ら2005,森田2008).このため,従来の研究は外観品質低下対策は,登熟期間のシンク能及びソース能の維持に重点を置き開発されている.本研究で深水無落水栽培に注目した理由は,新たな資材や技術を必要としないことから,生産者が容易に取り組むことが可能であると考えたためである.

しかし,慣行の移植栽培で深水かんがいを実施するためには以下の問題が考えられる.一つめは,生育に合わせて水深を制御しないと減収してしまう可能性があることである(大江ら 1994,菅井ら 1999,菅井ら 2001).このことは,収量を下げることなく栽培するにはこまめな水管理が必要であることを示している.二つめは,移植栽培では中干しが必要であり,その際にかんがい水を全て水田から外へ出してしまうことである.これは,深水かんがいは慣行栽培より多く水を要することを示しており,水資源の有効利用の点から中干しを行う慣行移植栽培を前提とした深水栽培が多くの面積で行えないことを示している.一方,移植栽培においても中干しをを行わずに成熟期までたん水深を維持する無落水栽培を行うことは可能だが,特に本県のような重粘な土壌地域では,収穫作業に与える影響を考慮すると実現は難しい.

濱田ら(2008)は,V溝直播で入水時から深水かんがいを実施しても収量が低下しないことを示した.また,V 溝直播は中干しを行う必要が無いため入水当初から水位を一定にしておけばよく,これによる深水無落水栽培の水管理は極めて省力的であることを利点としてあげた.本研究から,深水無落水栽培は慣行栽培と収量が変わらないことが判明した.さらに,整粒歩合

が増加し外観品質が向上することが判明した.これらの点から,深水無落水栽培は大規模経営体においても実施可能な栽培技術であると判断された.

最後に,外観品質以外の点からも深水無落水栽培の長所を考察したい.荒井・宮原(1956)は,移植時からたん水深を15 cm程度にすると雑草の発生を抑制できることを見出した.また,佐々木ら(1994)は,水深が深いほど,また深水かんがいにする期間が長いほど雑草の発生を抑制できるとしている.すなわち,深水かんがいの期間が長い深水無落水栽培では,この効果が最大限に生かすことができると期待される.また,深水区で雑草の発生が少ないことも確認しており,除草剤低減の点からも深水無落水栽培の有効性が期待できる.

以上から,深水無落水栽培は,複数年かつ複数の実験系で外観品質低下を抑制したこと,省力かつ低投入な栽培方法であること,外観品質向上以外の除草効果も期待できることから,近年問題視されているコシヒカリの外観品質を向上させる手法として有望と考えられた.

なお,千葉ら(2009)は,一穂籾数が増加するにもかかわらず深水かんがいによる外観品質向上は,シンクサイズの抑制のみでなく,光合成能(ソース能)の向上によるものであると推察した.前述したが,深水無落水栽培では,葉色の推移から,植物体の窒素濃度が高く維持されていると考えられる.石原ら(1979a,1979b)は葉身の窒素濃度と光合成速度との間に正の相関関係が存在することを示した.これらのことは,深水無落水栽培で外観品質が向上する要因は,光合成能の向上であることを示唆している.次章では,たん水深の違いが,植物体窒素濃度,気孔コンダクタンス,光合成速度に与え

る影響を調査し,この仮説を証明しようとした.

2.5　要旨

本研究では,不耕起V溝直播栽培と深水かんがいを組み合わせた「深水無落水栽培」が,白未熟粒の発生を抑制する効果について検討した. 試験期間は,2008年から2010年の3年間で,2つの圃場実験系で行なった.深水区では,慣行区と比較して,白未熟粒が5 %減少し,整粒歩合が10 %向上した.深水区では,草丈は長く,茎数は少なく,葉色は濃く推移した.穂数は減少したが,一穂もみ数が増加したため,深水区で減収は認められなかった.これらの効果は,複数年で複数の実験系で認められたことから,安定していると考えられた.

深水無落水栽培は,減収せず白未熟粒の発生を抑制すること,前提としている不耕紀V溝直播栽培でかんがい水深のみの変更であり労働時間を増加させないことから,省力的に玄米外観品質を向上させる栽培方法であると判断された.

図　表

表 1-1　耕種概要

試験	年度	播種日	除草剤			入水日
			出芽前 乾田期間	出芽後 乾田期間	入水後	
1	2008	4/16	4/28	5/16	5/28	5/19
	2009	4/9	4/23	5/15	5/27	5/19
	2010	4/19	4/30	5/28	6/5	6/1
2	2008	4/30	5/5	5/16	-	5/27
	2010	4/19	4/30	5/28	-	6/1

試験 1 では深水区(かんがい水深 20 cm)と慣行区(かんがい水深 10 cm)の 2 圃場を設定した. 試験 2 は傾斜水田で実施した. 詳細は, 材料及び方法に記載した.

表 1-2　出穂期及び出穂後 20 日間の平均気温

試験	年度	出穂日	出穂後20日間の平均気温（℃）
1	2008	8/2	28.0
	2009	8/4	26.5
	2010	8/3	27.4
2	2008	8/4	27.3
	2010	8/3	27.4

出穂日は, 全体の 40 %の株で出穂が認められた日.

表 1-3　深水処理が玄米外観品質に与える影響(試験 1)

年度	処理	外観品質(%)		
		整粒	乳白	基部未熟粒
2008	深水	68.5	4.7	9.1
	慣行	58.3	6.0	13.5
2009	深水	81.4	2.5	2.8
	慣行	78.8	2.0	4.1
2010	深水	69.8	2.3	11.2
	慣行	63.1	3.3	14.0
分散分析	年度 (Y)	**	**	**
	処理(D)	**	ns	*
	Y×D	ns	ns	ns

外観品質は,サタケ製品質判定機(RGQ110)で実施した. 玄米は整粒,乳白粒,基部未熟粒に区分した.**, * と ns は,それぞれ 1 % と 5 % 水準で有意差有り,及び有意差が無いことを示す(分散分析).深水区,かんがい水深を 20 cm とした区 ; 慣行区,かんがい水深を 10 cm とした区.

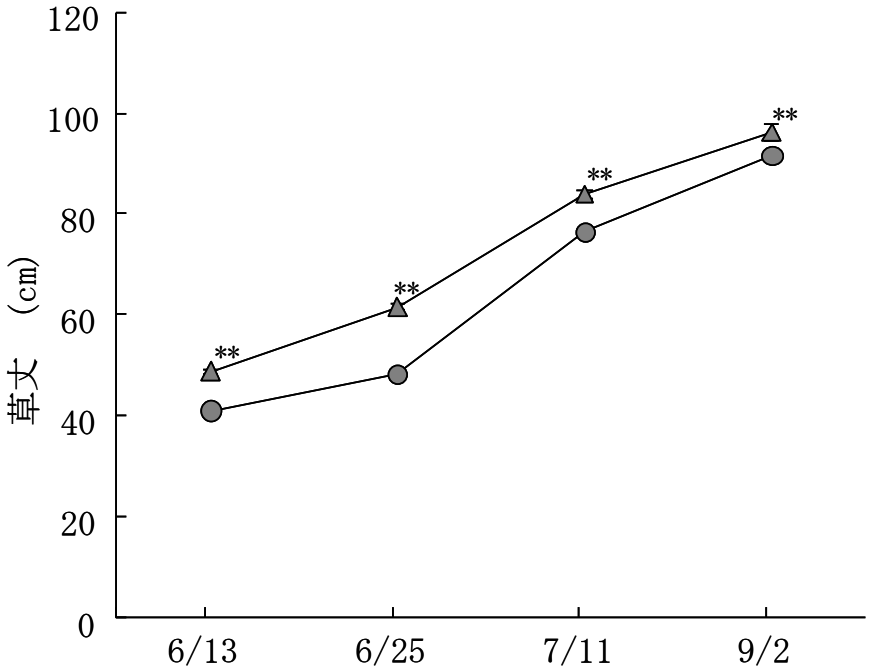

図 1-1 深水処理が草丈に与える影響（試験 1，2008 年）
▲，深水区（かんがい水深を 20 cm とした区）; ●，慣行区（かんがい水深を 10 cm とした区）．** は 1 %水準で有意差が有ることを示す(t 検定).縦棒は標準誤差を表す.

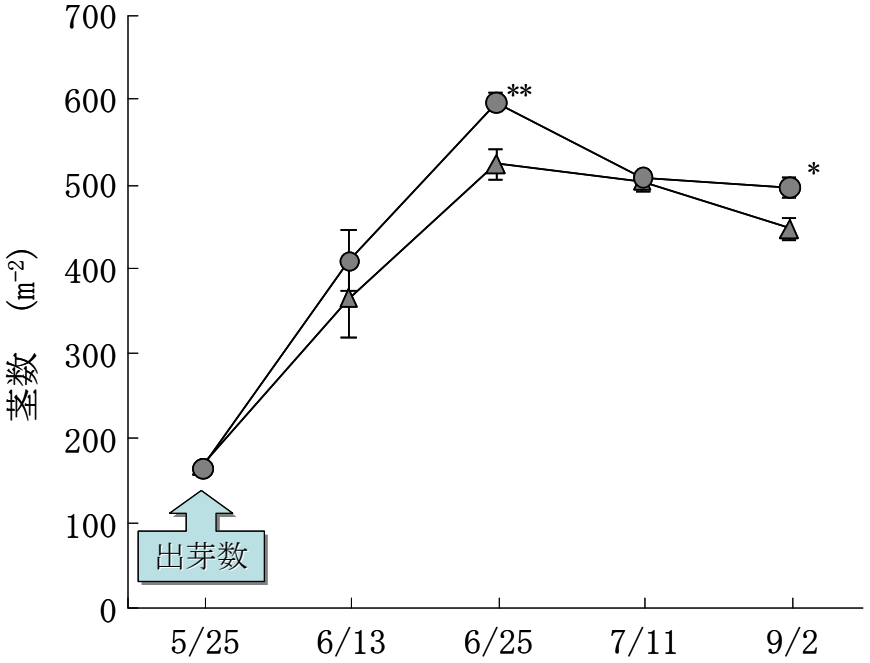

図 1-2 深水処理が茎数に与える影響（試験 1，2008 年）
▲，深水区（かんがい水深を 20 cm とした区）; ●，慣行区（かんがい水深を 10 cm とした区）．**と*は 1 %と 5%水準で有意差が有ることを示す(t 検定).縦棒は標準誤差を表す.

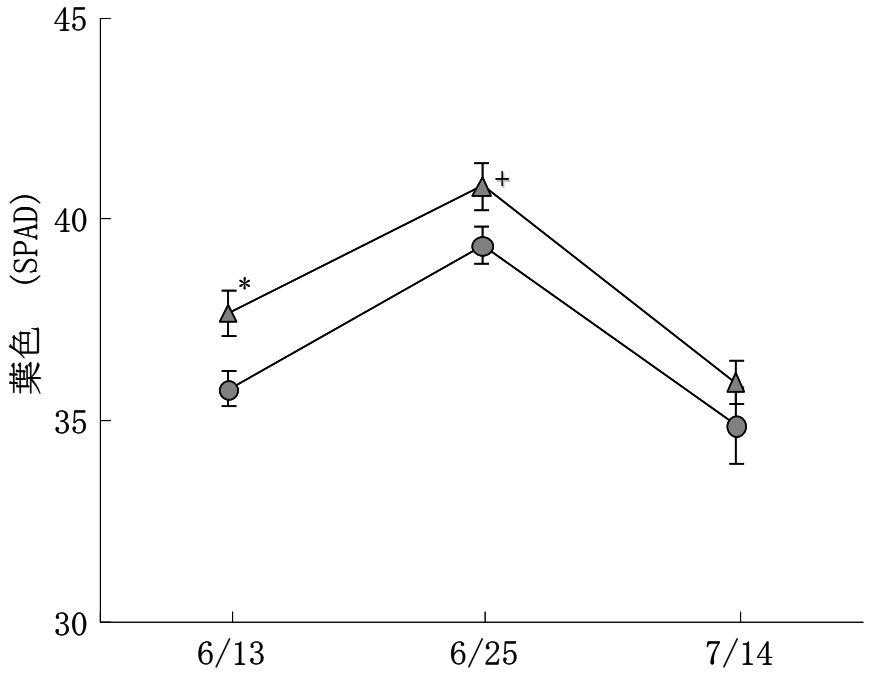

図 1-3 深水処理が葉色に与える影響（試験 1，2008 年）
▲，深水区（かんがい水深を 20 cm とした区）; ●，慣行区（かんがい水深を 10 cm とした区）．*と+は 5 %と 10%水準で有意差が有ることを示す(t 検定).縦棒は標準誤差を表す.

表 1-4　深水処理が収量及び収量構成要素に与える影響(試験 2)

年度	処理	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (m^{-2})	精玄米重 (g m^{-2})	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	籾数 m^2あたり (×10^3)	籾数 一穂あたり
2008	深水	93.9	17.8	472	552	82.6	21.9	31.5	67.2
	慣行	91.6	17.5	499	555	81.9	21.8	31.0	62.3
2009	深水	101.2	17.5	501	559	85.6	23.0	28.4	60.7
	慣行	93.7	17.4	569	548	85.7	22.6	27.4	48.0
2010	深水	97.0	19.0	415	471	81.5	20.3	28.5	69.8
	慣行	92.3	17.7	458	481	76.9	21.2	29.5	63.4
分散分析	年度(Y)	**	ns	**	**	**	**	**	**
	処理(D)	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	**
	Y×D	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns

収量及び千粒重は,1.85 mm の篩で選別し水分含量 14.5 %に換算した値.**, * と ns は,それぞれ 1 % と 5 % 水準で有意差有り,及び有意差が無いことを示す(分散分析).深水区,かんがい水深を 20 cm とした区;慣行区,かんがい水深を 10 cm とした区.

表 1-5　深水処理が玄米外観品質に与える影響(試験 2)

年度	水深 (cm)	外観品質(%)		
		整粒	乳白粒	基部未熟粒
2008	20	59.1 a	9.1 a	12.7 a
	15	55.1 ab	8.8 a	19.1 ab
	10	51.5 b	9.0 a	19.4 b
2010	20	57.5 a	6.0 a	20.0 b
	16	55.1 ab	7.6 a	21.0 ab
	12	51.7 b	7.3 a	24.5 a
	8	51.7 b	7.5 a	24.5 a

外観品質は,サタケ製品質判定機(RGQ110)で実施した. 玄米は整粒,乳白粒,基部未熟粒に区分した.同一英文字間には 5 %水準で有意差が無いことを示す(Tukey 法).

表 1-6　深水処理が収量及び収量構成要素に与える影響(試験 1)

年度	水深 (cm)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (m^{-2})	精玄米重 ($g\ m^{-2}$)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	籾数 ㎡あたり ($\times 10^3$)	籾数 一穂あたり
2008	20	101.1 b	19.2 a	413 a	588 a	85.5 a	21.6 a	31.8 a	77.1 b
	15	94.7 ab	18.1 a	458 a	583 a	83.2 a	21.7 a	32.4 a	70.7 ab
	10	91.2 a	17.9 a	513 b	591 a	83.9 a	21.4 a	32.9 a	64.0 a
2010	20	98.0 a	20.0 a	360 a	526 a	78.7 a	22.4 a	30.0 a	89.8 a
	16	93.0 ab	20.4 a	348 a	511 a	80.3 a	21.5 a	29.7 a	87.4 a
	12	92.0 b	19.6 a	399 a	493 a	77.1 a	22.4 a	28.8 a	75.7 a
	8	90.3 b	19.0 a	398 a	512 a	81.2 a	21.0 a	30.2 a	70.0 a

収量及び千粒重は,1.85mm の篩で選別し水分含量 14.5%に換算した値.同一英文字間には 5%水準で有意差が無いことを示す(Tukey 法).

第三章

深水無落水栽培が白未熟粒の発生を抑制する機構の解明

3.1 緒言

前章で,不耕起V溝直播栽培をかんがい水深20 cmで管理する「深水無落水栽培(以下,深水栽培と略する)」は,水稲の収量を下げることなく夏季の高温による玄米外観品質(以下,外観品質と略する)低下を抑制することを示した.

登熟期の高温条件による障害粒発生の要因は,シンク機能とソース能の低下と考えられている(近藤ら 2005,Chang ら 2007,Wang ら 2007,森田 2008).このため,白未熟粒の発生を抑制するためには,シンク能とソース能を維持することが重要である.

一方,若松ら (2008)は,温暖地で問題視される背白と基白粒の発生は,玄米蛋白質含量と負の相関関係が存在していることを指摘した.一般的に,玄米蛋白質含量と穂ぞろい期の葉色との正の相関関係が存在していることが知られており(岡本と堀野 1994,若松ら 2008),葉の窒素濃度を向上させると,光合成活性が向上することが知られている(Makino 2003,Ookawa ら 2003,Zang と Kokubun 2004).田畑ら (2008)は,成熟期の断根処理の結果から,この時期に光合成速度を低下させると,白未熟粒の発生が助長されることを報告した.これらのことは植物体の窒素濃度を上げ,光合成速度(ソース能)を高めることで障害粒の発生が抑制できることを示唆している.

前章の結果から,深水無落水栽培では,慣行の不耕起V溝栽培に比較して生育期間の葉色が濃いことが判明した.また,深水処理により,葉色が濃くなり(桐山と中谷 1987,錦ら 1987,古谷ら 1991),葉身の窒素濃度が向上

する(桐山と中谷 1987,Won ら 1999,佐藤ら 2004,Ohe ら 2010,千葉ら 2011)ことが報告されている.これらのことから,深水無落水栽培で外観品質が向上する要因は,葉の窒素濃度が高いことによる光合成速度(ソース能)の向上である可能性を示している.

そこで本研究では,慣行の不耕起 V 溝直播栽培に比較してかんがい水深を 20cm で維持する深水無落水栽培では光合成活性が高く維持され,その結果障害粒の発生率が低下すると考え,植物体の窒素含量,気孔コンダクタンス及び光合成速度を計測しこの仮説を検証しようとした.

なお,Johnes (1999)は,ｻｰﾓｸﾞﾗﾌｨｰを用い葉の表面温度を測定することで,気孔コンダクタンスが推定可能であることを示した.そこで,本研究でも植物体の気孔コンダクタンスを簡易に測ることを目的に,ｻｰﾓｸﾞﾗﾌｨｰを用いて葉及び穂の表面温度を調査した.

3.2 材料と方法

1.試験材料

前章と同様,品種はコシヒカリを用いた.試験は,愛知県農業総合試験場作物研究部(愛知郡長久手町)で採取した種子を用い実施した.種子は出芽率向上のため殺菌剤,チウラム水和剤を種子重あたり 0.5 %で粉衣処理し,催芽せずに不耕起 V 溝直播機(以下,V 直播種機と略する)で 7 g m^{-2} となるように播種した.なお,使用した V 直播種機は,十条播種機で条間は 20 cm だった.播種同時に,播種溝へ市販されている不耕起直播専用肥料を窒素成分量で 7.8 g m^{-2} 施用した.

2. 試験構成

試験処理として,たん水深が20 cmの区(以下,深水区と称する)と10 cmの区(以下,慣行区と称する)をそれぞれ4反復設定した.

耕種概要を,表2-1に示した.雑草防除のため,播種後出芽前にｸﾞﾘﾎｻｰﾄ液剤を,水稲出芽後の乾田期間にｼﾊﾛﾎｯﾌﾟﾌﾞﾁﾙﾍﾞﾝﾀｿﾞﾝ液剤を散布した.なお,たん水深は各区のたん水深は入水から落水まで保った.入水後,除草剤ﾋﾟﾗｿﾞﾚｰﾄ粒剤を散布した.

3.調査方法

1)窒素濃度の調査(2008年,2009年)

幼穂形成期(2008年7月16日,2009年7月10日),出穂期(2008年8月8日,2009年8月10日),成熟期(2008年9月12日,2009年9月15日)に植物体をサンプリングし,器官(穂,葉身,茎+葉鞘)に分け風乾し,炭素窒素分析計(JM1000CN,ｼﾞｪｲｻｲｴﾝｽ社製)で窒素量を測定した.

2)葉と穂の表面温度調査(2008年)

2008年の8月14日と8月21日に実施した.測定は,赤外線ｻｰﾓｸﾞﾗﾌｨｰ(NS9200,NEC 三栄社製) を用い(図2-1),8月14日には10～13時,8月21日には10時30分～15時に実施した.測定データを画像処理し,任意の10地点の穂と葉温を求めた.

3)気孔コンダクタンスと光合成速度(2008 年,2009 年)

気孔コンダクタンスを,2008年には8月1日,8月14日,8月21日に,2009年には 7 月 15 日,8 月 13 日,8 月 20 日,8 月 26 日,9 月 1 日にﾘｰﾌﾎﾟﾛﾒｰﾀ(Delta-T 社製) で測定した.止葉が抽出する前(2009 年 7 月 15 日)には展開第2葉を,その他の調査日には止葉を,各区10個体について計測した.調査は,2009 年 7 月 15 日には日変化を検討するため 7 時から 14 時にかけ 1 時間毎に,その他は 11 時に行った.

光合成速度を,2008 年 8 月 22 日と 2009 年 8 月 21 日に携帯式光合成蒸散測定装置(Licor 社製,LI-6400)で計測した.計測は各区 5 個体ずつ,2008 年は午前 11 時 15 分から 45 分の間,2009 年は午前 10 時 55 分から午前 11 時 20 分の間に行った.

3.3 結果

1.植物体の窒素濃度(2008 年,2009 年)

2 年間をとおし,深水区の葉の窒素濃度は,標準区に比較して有意に高かった.深水区の葉の窒素濃度は,生育期間をとおし有意に高かった(表 2-2).一方,茎について,深水区の窒素濃度は,慣行区と比較して幼穂形成期と成熟期で有意に高かった.穂の窒素濃度は 2 処理区内に有意な差は認められなかった.

成熟期の深水区の窒素吸収量は,慣行区より高かった.特に,2009 年は 3.96 g m^{-2} とその差が大きかった.

2. 葉と穂の表面温度（ 2008 年 ）

葉温は, 8 月 17 日は 10 時, 8 月 21 日は 10 時 30 分で, 深水区が慣行区より有意に温度が低かった（ 表 2-3 ）.

深水区の穂温は, 葉温と同様に 10 時前後で慣行区より有意に低かった. それ以外の時間は差が認められなかった.

3. 気孔コンダクタンスと光合成速度（ 2008 年, 2009 年 ）

深水区と慣行区の比較を行なう最適な調査時刻を設定するために, 7 時から 14 時まで 1 時間毎に調査した. その結果, 調査を開始した 7 時には両処理区に差が認められないものの, 8 時から深水区が有意に低くなった（図 2-2）. その傾向は 12 時まで継続したが, 13 時以降に再び両区間に差が認められなかった. なお, 両試験区間の差は時が最も大きかった. この結果を受け, これ以降は 11 時で比較を行うこととした.

2008 年では, 8 月 21 日で深水区の気孔コンダクタンスが有意に高かった（ 図 2-3 ）. 一方, 他の調査日については, 有意な差は認められないものの深水区が高い傾向を示した.

2009 年でも, 全ての調査区で, 深水区の気孔コンダクタンスが慣行区に比較して有意に高かった. なお, 出穂前である 7 月 15 日から, 深水区の気孔コンダクタンスが慣行区に比較して, 有意に高かった.

2 年間をとおし, 出穂後 15 日頃の深水区の光合成速度は慣行区に比較し有意に大きかった（ 表 2-4 ）. この傾向について, 年次との交互作用は認め

られなかった.

4.温度環境調査

出穂後 20 日間と成熟全期間の,試験ほ場における気温,水温,地温の比較を行なった.その結果,気温で年次間差異が認められた以外は,全ての調査項目で有意な差は認められなかった(表 2-5).

3.4 考察

1.深水処理が窒素濃度に及ぼす影響

一般的に,葉色と葉の窒素濃度との間には正の相関関係が存在することが知られている(松島ら 1970,中鉢ら 1986).前章において,深水区の葉色が濃かったことから,深水無落水栽培では葉の窒素濃度が高く維持されていると推察した.なお,過去の試験結果から,深水処理により水稲の葉色は濃く維持されることが報告されている(桐山と中谷 1987,錦ら 1987,古谷ら 1991).さらに,桐山と中谷(1987)は,深水処理により実際に植物体窒素濃度が高く維持されたことを示した.これらの研究と同様に,本研究結果でも深水区で窒素濃度が高く維持された.

佐藤ら (2004)は深水処理による茎数が抑制され,その結果植物体窒素濃度が向上したと推察した.また,Won ら (1999)は,特に乾田直播栽培では,無効分げつが抑制され,植物体の窒素濃度が上昇したことを報告した.

本研究においても,深水区では茎数の増加が抑制され,葉色が濃くなる傾向が認められた.よって,植物体の窒素濃度が増加する要因は,無効分げつ

発生の抑制であると考えた.ただし,深水処理により根からの窒素吸収が増加する可能性も指摘されている(Won ら 1999).施肥窒素の利用効率を推定するために,安定同位体(^{15}N)を利用する手法がある(広川ら 1992,佐藤ら 1993).今後は,窒素の安定同位体を用い,深水処理で植物体窒素濃度が向上する要因を詳細に検討したい.

2.深水処理が光合成に及ぼす影響

千葉ら (2009)は,収量構成要素の中で一穂籾数と登熟歩合の結果から,深水処理による外観品質向上効果は,ソース能の向上によりもたらされると推察した.また,Ohe ら (2010)は,単位窒素施量あたりの収量が深水処理により増加すること報告した.しかし,Ohe ら (2010)は,この効果が茎数抑制(シンクの抑制)によりもたらされるのか,光合成速度の向上(ソース能の向上)によりもたらされるのかについては明らかにしていない.千葉ら (2011)は,穂揃い期における葉身の窒素濃度と登熟期間における葉面積が深水処理により向上することから,光合成能と光合成産物の転流分配能力が向上する可能性について議論した.しかし,深水処理が気孔コンダクタンスや光合成活性等,植物体の光合成関連形質に与える影響について直接検証していない.そこで,本研究では深水処理が光合成に与える影響を調べた.

植物体表面温度の調査結果から,深水区が10時から10時半の間で慣行区より葉温が低いことが示された.Jones(1999)は,葉の表面温度と気孔コンダクタンスとの間に負の相関があることを見出した.

しかし,植物体の表面温度は,風速や日射量などの環境要因にも影響を受けることが知られている(Jones1999).そこで,葉の表面温度から,蒸散,気孔コンダクタンスを直接推定することは難しい.そこで,葉の気孔コンダクタンスと光合成速度を調査した.その結果,2 年間をとおし深水区は慣行区より気孔コンダクタンスが高く推移した.また,光合成速度も深水区で高かったことから,深水処理により光合成速度が向上することが示された.

一方,成熟期間の水温や地温が外観品質に影響を与えることが報告されている(重山ら 1999,荒井と伊藤2001,坪根ら 2008,Arai-Sanohら 2010).深水処理が,水温や地温に影響を与える可能性も考えられるため,気温も含め調査したが,その結果,気温,水温,地温とも 2 試験区間に差が認められなかった.このことから,深水処理により微気象等環境要因が変化し,外観品質が向上する可能性は無いことを明確にした.

3.白未熟粒の発生率を低下させるメカニズムについて

若松ら (2008)は,玄米の蛋白質含量と登熟期間の高温条件に起因する白未熟粒の発生率との間に負の相関関係が存在することを示した.また,田中ら (2010)は登熟期間の植物体窒素濃度を向上させると,白未熟粒の発生率が減少することを報告した.これらは,登熟期間の窒素濃度が白未熟粒の発生に影響を与えることを示している.さらに,田畑ら (2010)は,成熟期の光合成速度を制限することを目的に根を切除する処理を行なった結果,背白粒の発生が多くなったことを報告した.本研究の結果でも,光合成速度が高い深水区で白未熟粒の発生が少なかった.

一般的に,光合成速度は葉の窒素濃度に強く影響を受ける(Makino2003,Ookawa ら 2003,Zang と Kokubun2004,Hirasawa ら 2010).光合成速度に影響を与える,気孔コンダクタンスも葉の窒素濃度に影響を受ける(石原ら 1979a,1979b,Makino ら 1987,Hirasawa ら 2010).これらの報告や本研究結果から,深水処理の白未熟粒抑制効果は,植物体窒素濃度が上昇し,光合成活性が向上に起因すると考えた.

なお,大江と三本(1999)は,深水かんがいによって一穂あたりの乾物生産性が向上することを示した.さらに,千葉ら (2009)は密植により深水かんがいによって抑制される茎数を補償することで増収が可能となることを示唆している.Ohe ら (2010)は,一般に倒伏が増加する散播による湛水土中直播栽培でも,深水栽培により耐倒伏性が向上することを示した.本研究においても,深水区の方が慣行区と比較して一穂もみ数が多いにもかかわらず登熟歩合が低下せず,これらの報告と同様の現象がみられた.さらに,深水区で生育期間をとおして気孔コンダクタンスが高かったことから,一穂あたりの乾物生産量は多いと考えられた.これらの結果は,深水無落水栽培が白未熟粒を低下させるだけでなく増収技術にもなりうることを示している.

3.5 要旨

本研究では,深水無落水栽培により,窒素吸収量が増加し,光合成関連形質が向上することが,白未熟粒の発生を減少させる要因であることを実証した.そこで,植物体窒素濃度,葉の気孔コンダクタンス,光合成速度を直接

計測した. 実験は, 2008 年と 2009 年に行なった.

2 年間とも, 生育期間をとおし, 深水区の葉の窒素濃度は, 慣行区に比較して, 有意に高かった. 深水区の気孔コンダクタンスは, 慣行区より高く, 登熟期間の光合成速度も深水区の方が高かった. よって, 深水区では光合成活性が向上していると考えられた. 以上と前章の結果から, 深水区で白未熟粒の発生が抑制される要因は, 光合成活性の向上（ ソース能の向上 ）であると考えた.

図　表

表 2-1　耕種概要

年度	播種日	除草剤			入水日
		出芽前 乾田期間	出芽後 乾田期間	入水後	
2008	4/16	4/28	5/16	5/28	5/19
2009	4/9	4/23	5/15	5/27	5/19

深水区(かんがい水深 20 cm)と慣行区(同 10 cm)の 2 ほ場を設定した.

表 2-2　深水処理が植物体の窒素濃度に与える影響

年度	処理	幼穂形成期		出穂期			成熟期			全窒素量
		葉	茎	葉	茎	穂	葉	茎	穂	(g m^{-2})
2008	深水区	2.44	0.95	2.25	0.74	1.01	1.02	0.56	0.95	11.90
	慣行区	2.20	0.80	2.08	0.77	1.04	0.95	0.53	1.00	11.56
2009	深水区	1.92	1.08	1.93	0.68	0.89	1.16	0.64	1.12	13.94
	慣行区	1.69	0.87	1.91	0.66	0.92	0.93	0.53	0.95	9.98
分散分析	年度(Y)	**	**	**	**	**	ns	*	*	ns
	処理(D)	**	**	*	ns	ns	**	**	ns	*
	Y×D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	*

単位は重量 %.サンプル収集日,幼穂形成期(2008.7.16;2009.7.10);出穂期(2008.8.8;2009.8.10); 成熟期(2008.9.12;2009.9.15). 窒素濃度は炭素窒素分析計(JM1000CN,, J サイエンス製)で計測した. 全窒素量は,成熟期の植物体の乾物重に窒素濃度を乗じた値。**, * と ns は,それぞれ 1% と 5% 水準で有意差有り,及び有意差が無いことを示す(分散分析).深水区,かんがい水深を 20 cm とした区;慣行区,かんがい水深を 10 cm とした区.

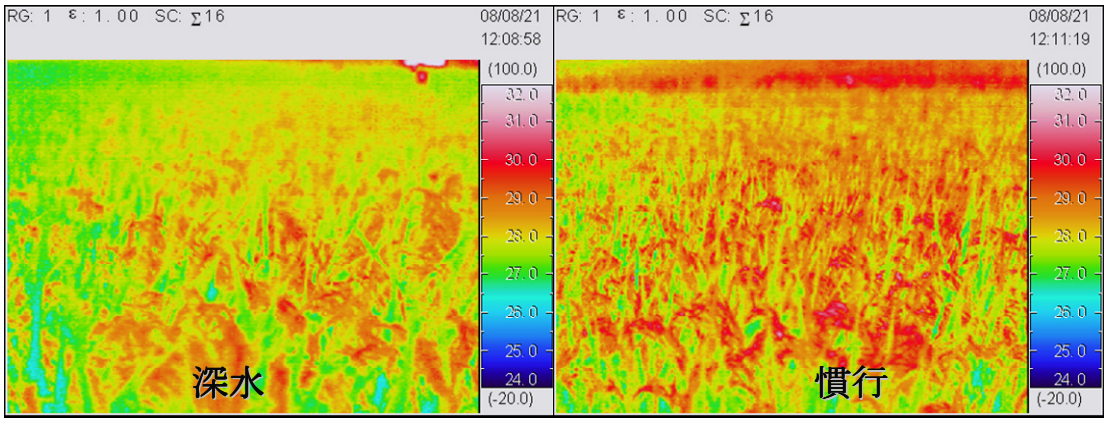

図 2-1 植物体の表面温度計測画像

計測は赤外線サーモグラフィー(NEC 三栄社製)で行なった.測定日時は, 2008 年 8 月 21 日,午前 10 時 30 分. 深水区,かんがい水深を 20 cm とした区 ; 慣行区,かんがい水深を 10 cm とした区.

表 2-3　深水処理が植物体の表面温度に与える影響

処理	部位	8/14			8/21			
		1000	1100	1300	1030	1200	1300	1500
深水	穂	30.6	30.5	33.7	28.0	29.2	28.8	27.9
慣行		33.2	30.5	33.5	29.3	29.7	28.6	27.8
t検定		**	ns	ns	**	ns	ns	*
深水	葉	29.2	29.0	31.1	26.3	27.4	27.0	28.3
慣行		30.0	29.0	30.9	27.1	27.2	26.7	27.8
t検定		**	ns	ns	**	*	ns	ns

単位は℃. 計測は赤外線サーモグラフィー(NEC 三栄社製)で行なった. **, * と ns は,それぞれ 1 % と 5 % 水準で有意差有り,及び有意差が無いことを示す(分散分析).深水区,かんがい水深を 20 cm とした区;慣行区,かんがい水深を 10 cm とした区.

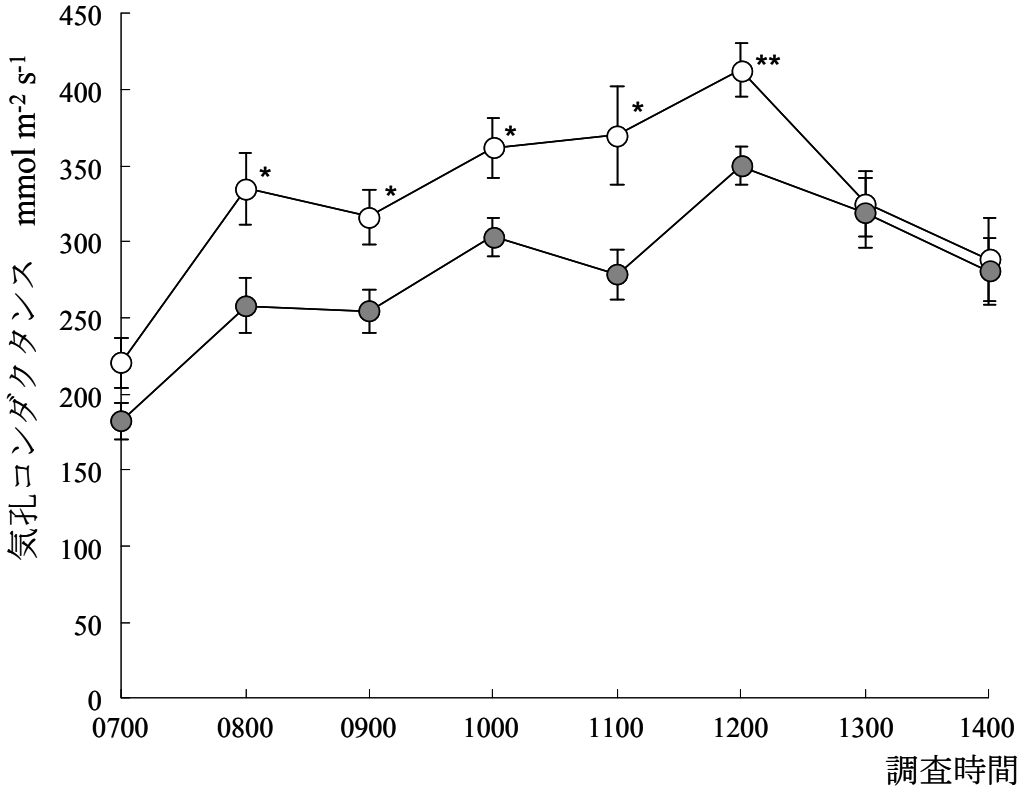

図 2-2　深水処理が気孔コンダクタンスの推移に与える影響
2009 年 7 月 15 日に測定した.気孔コンダクタンスはポロメーター(SC-1,DECAGON 社製)で計測した. ○ , 深水区,かんがい水深を 20 cm とした区; ● , 慣行区,かんがい水深を 10 cm とした区. **と*は 1 %と5%水準で有意差が有ることを示す(t 検定). 縦棒は標準誤差を表す.

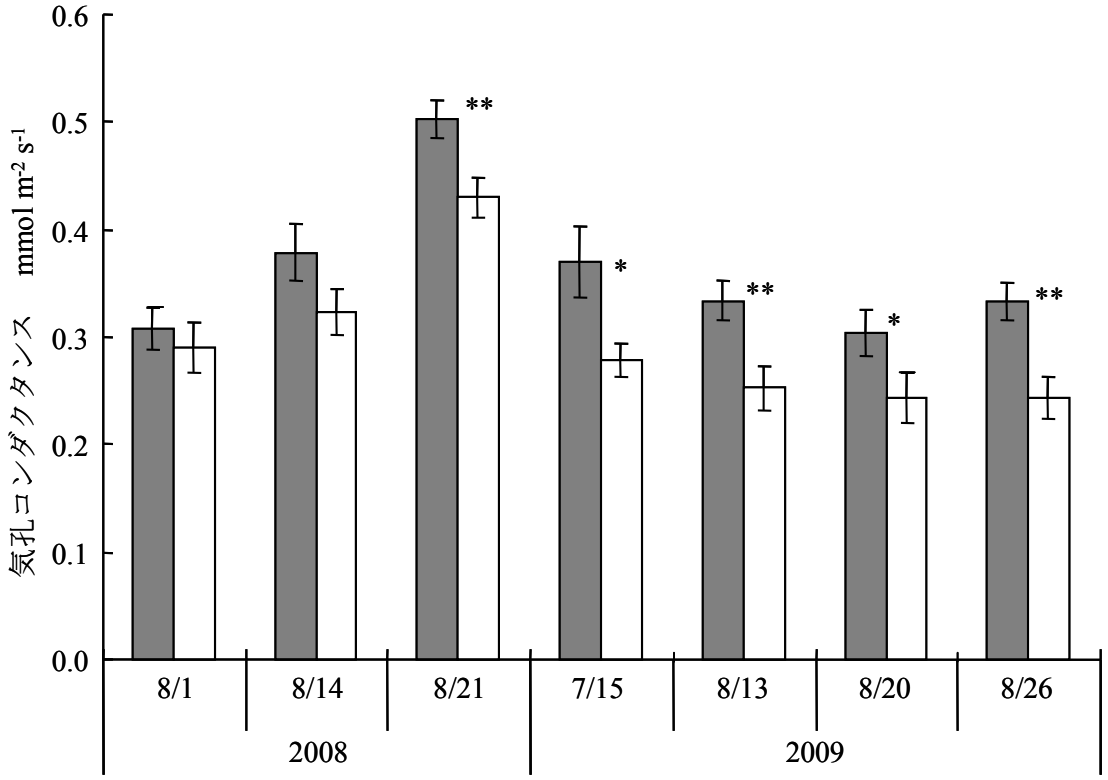

図 2-3　深水処理が気孔コンダクタンスに与える影響
気孔コンダクタンスはポロメーター(SC-1,DECAGON 社製)で計測した.全ての日で 11 時に計測した.■, 深水区,かんがい水深を 20 cm とした区;□, 慣行区,かんがい水深を 10 cm とした区. **と*は 1 %と 5%水準で有意

表 2-4　深水処理が光合成速度と気孔コンダクタンスに与える影響

年度	処理	光合成速度 (μ mol m^2 s^{-1})	気孔コンダクタンス (mol m^{-2} s^{-1})
2008	深水区	21.6	0.99
	慣行区	15.2	0.49
2009	深水区	26.4	1.87
	慣行区	17.5	0.97
分散分析	年度(Y)	**	**
	処理(T)	**	**
	Y × T	ns	ns

測定日は2008.8.22と2009.8.21.調査時間は11時15分-11時45分(2008年)と10時55分-11時20分(2009年). 光合成速度と気孔コンダクタンスは携帯式光合成蒸散測定装置(Licor社製LI-6400)で計測した.**とns は,それぞれ 1 % 水準で有意差及び有意差が無いことを示す(分散分析).深水区,かんがい水深を20 cmとした区;慣行区,かんがい水深を10 cmとした区.

表 2-5　深水処理が登熟期間の気温, 水温, 地温に与える影響

年度	処理	平均気温		平均水温		平均地温	
		登熟期間	出穂後20日間	登熟期間	出穂後20日間	登熟期間	出穂後20日間
2008	深水区	27.5	29.1	25.5	26.5	25.6	26.1
	慣行区	27.5	29.0	25.7	26.7	25.4	25.8
2009	深水区	26.0	26.5	25.7	26.5	25.2	25.8
	慣行区	26.0	26.4	25.5	26.3	25.2	25.8
分散分析	処理(T)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	年度(Y)	**	**	ns	ns	ns	ns
	T× Y	ns	ns	ns	ns	ns	ns

単位は ℃. 気温は地表上100 cmで計測した. 水温は地表付近で計測した. 地温は, 地表下 5 cmで計測した. **と ns は, それぞれ 1 % 水準で有意差及び有意差が無いことを示す(分散分析). 深水区, かんがい水深を 20 cmとした区 ; 慣行区, かんがい水深を 10 cmとした区.

第四章

登熟期間の高温が水稲の穂への炭素転流に及ぼす影響

4.1 緒言

従来の研究結果で,白未熟粒の白濁部分は,アミロプラストの形成が阻害されサイズが小さくなっており(Tashiro と Wardlaw 1991,Zakaria ら 2002),このため透過光が乱反射すること(田代と江幡 1975)により発生することが明らかになっている.なお,アミロプラストの形成が阻害される要因として,玄米でのデンプン合成能や糖の輸送能力(シンク能)と茎葉での同化産物供給能(ソース能)の低下が考えられる(近藤 2006,Cheng 2007,Wang ら 2007,森田 2008).実際に,止葉の切除(ソース能の制限)により白未熟粒の発生は助長され,逆に枝梗の切除(シンクの制限)により発生が抑制されることが知られている(飯田と塚口 2006,永畠ら 2006,中川ら 2006,Wang ら 2007).その他にも,間引きにより強制的に植物体の受光体勢を改良すると白未熟粒が少なくなること(小葉田ら 2004),弱勢花に発生が多いこと(Cheng ら 2007,大谷と吉田 2008)からも,白未熟粒の発生はシンクーソースのアンバランスによると考えられる.

また,白未熟粒の発生頻度は品種によって異なることが知られている(長戸と江幡 1965,西村ら 2000,飯田ら 2002,山川と神田 2003,岩松ら 2007).特に,愛知県で育成した「初星」は,高温処理により背白粒等の白未熟粒が発生しやすい品種とされている(西村ら 2000,飯田ら 2002,山川と神田 2003,岩松ら 2007).一方,日本で栽培面積が多い「コシヒカリ」の高温時の白未熟粒発生程度からみた高温耐性は,やや強から中に分類される場合が多い.品種間差異が発生する要因については十分に判明していないが,これらのことから,初星とコシヒカリを用い,高温時における生理反応

の違いを検討することは,白未熟粒発生要因の解明には有益であると考えられる.さらに,白未熟粒の発生は,前述したとおり胚乳へのデンプン蓄積,すなわち炭素動態が深く関係しており,これを解明することは極めて重要である.

植物体において,元素の動態を検討する方法として,同位体を用いる方法がある.炭素についても,安定同位体である ^{13}C を用いて解析が行なわれいる(Kouchi と Yoneyama 1984a,1984b,Kouchi ら 1985,Tatsumi ら 1992,Hirano ら 1996,Ito ら 2009).Ito ら (2009)は,登熟期間に同化された炭素の動態が高温条件により受ける影響を検討することを目的に ^{13}C を暴露する研究を行った.その結果,高温処理区で出穂 14 日後に暴露した ^{13}C の成熟期の穂での残存量が少ないことから,高温条件により光合成産物の転流が減少したことを示した.また,Cheng ら (2007),大谷と吉田(2008)は,高温による品質低下は弱勢花で著しいことを報告している.これらの結果は,成熟期の高温に起因する白未熟粒の発生は,特に弱勢花に対する光合成産物の分配が減少し発生することを示唆している.そこで本研究では,白未熟粒発生頻度が異なる 2 品種(コシヒカリ,初星)を用い,^{13}C で標識した CO_2 を暴露することで,高温条件が水稲の炭素転流に及ぼす影響を検討し,上記の仮説を証明しようとした.

4.2 材料と方法

試験は 2005 年に茨城県つくば市の独立行政法人農業・生物特定産業技術研究機構作物研究所内で行なった.供試品種は,初星とコシヒカリだっ

た.1/5000 a のワグネルポットを使用し,両品種の出穂期を揃えるために,初星は5月31日,コシヒカリは5月25日に移植した.基肥として,移植日に窒素量で1ポットあたり0.5gの肥料(硫安:LP70=1:1)を施用した.

高温処理時期,出穂期,^{13}C暴露を行なった日,成熟期は表3-1に示した.

処理区として,高温区と無処理区を設定した.高温区は出穂1週間後の個体を無加温のガラス温室内に移動し栽培した.高温処理は,初星では8月22日から9月27日,コシヒカリでは8月29日から10月3日にかけて行った.

^{13}C 暴露は出穂期から 2 週間後に実施した.陽光チャンバー内で ^{13}C 99atom %の CO_2 を直接暴露する方法により行なった(Kouchi と Yoneyama 1984a,1984b,Kouchi ら 1985).なお,温度条件は,高温区は33℃,無処理区は27℃とし,7時から14時までの7時間暴露した.処理時における,陽光チャンバー内の^{13}C同位体比は,62～67atom %の間に制御した.

試料のサンプリングは^{13}C暴露直後と成熟期の2回,各区4ポットずつ行った.採集試料を,葉,穂,茎に分け通風乾燥機で風乾した.サンプルは乾物重を計測後,ウイレーミルとボールミルで微粉砕し,同位体質量分析機(Delta Plus XP,Termo社製)にて^{13}C濃度を計測した.

玄米外観については,穂の上位(穂上部)と下位(穂下部)で分け調査した.まず,品質判定機(RS2000,静岡精機製)で整粒,未熟粒に分けた.さらに,未熟粒について目視で白未熟粒の種類を判定した.

4.3 結果と考察

１. 処理条件

出穂期, 成熟期は表 3-1 のとおりである.

出穂期が 5 日程度異なったにもかかわらず, 両品種とも登熟期の高温区の平均気温は, 無処理区に比較して 2℃以上高かった(図 3-1). また, 外観品質に影響を与える出穂後 20 日間の平均気温は 27℃を上回った.

若松ら (2008)が白未熟粒の発生量が多くなるとしている 27℃を超えていることから, 本研究の高温区は無加温であるものの白未熟粒発生の条件を再現できたと考えられた.

2. 玄米外観品質

整粒歩合は, 穂上部が穂下部に比較して有意に高かった(表 3-2). 特に, 弱勢花が多いと考えられる穂下部で整粒歩合が低かった. 一方, 未熟粒と障害粒は, 下穂で多く, 弱勢花で発生が多いとしている大谷と吉田 (2008) の結果と一致した.

次に, 品種間による違いを検討すると, コシヒカリの処理区間では差が認められないものの, 初星では高温区特に穂下部で整粒が少なく, 未熟粒が多かった. さらに, 未熟粒の種類では, 背白粒と基白粒が多かった. これまでの研究でも, 高温処理による, 初星の外観品質低下は白未熟粒の増加によることが示されており(西村ら 2000, 飯田ら 2002, 山川と神田 2003, 岩松ら 2007), 本研究でも同様の結果を得た.

3. 登熟期間における ^{13}C の動態

^{13}C について,暴露した直後と成熟期のサンプルとを比較すると,両品種,両処理区とも全体,葉,茎で減少し,穂で増加した(表 3-3).全てのサンプルで,根には,ほとんど ^{13}C が存在しなかった.これらのことは,暴露した ^{13}C が葉,茎に取り込まれ,その後,穂に再転流していくことを示している.

一方,成熟期で無処理区に比較して高温区の ^{13}C 量が低かった.特に,穂での差が大きかった.Ito ら (2009)は,高温処理により成熟期の穂で登熟期に暴露した ^{13}C 量の残存量が減少することから,高温条件により転流が影響を受ける可能性を指摘したが,本試験の結果と一致した.

4.玄米への転流に関する品種間差異

一粒あたりの全炭素量は初星がコシヒカリより有意に多かった(データ一省略).同じ全炭素量で比較すると,初星がコシヒカリより障害粒率が高かった(図 3-2).このことは,初星が白未熟粒を発生させないためには,より多くの炭素量を必要とすることを示している.高田ら (2008)は,22 品種・系統の穂相や粒形の検討結果から,外観品質は粒形,特に粒幅と粒厚が増加すると白未熟粒が発生しやすいことを示している.初星は,同熟期の他品種に比較して粒厚が厚い(香村ら 1977).このことも,登熟期における高温により初星で白未熟粒の発生が多くなる要因と考えられた.しかし,田畑ら (2005)は初星と越路早生の交配後代系統について解析した結果から,粒形と白未熟粒の発生に明確な関係が認められないと報告した.このことは,粒形以外の原因で,初星において白未熟粒が多く発生することを示すと考えられた.

次に,成熟期の ^{13}C 量について穂上部を穂下部で除した値について品種間で比較した.その結果,無処理区では 1.0 と両品種間で差が認められないものの,高温区ではコシヒカリが 1.3 であったのに対し初星が 1.0 であった(図 3-3).このことは,高温条件で登熟する場合,コシヒカリでは強勢花が多いと考えられる穂上部に光合成産物が優先的に転流されるのに対し,初星では同様な機構が働かず,全ての穎果に転流が行なわれていることを示唆する.Okawa ら(2003)は,登熟初期に行った ^{13}C の暴露試験の結果から,登熟期間に遮光を行うと弱勢花でのみ ^{13}C の量が減少することを示した.これは,シンクサイズに対し光合成産物の供給量が減少すると,強勢花へ相対的に多く転流が行われることを示唆している.

佐々木ら(2008,2009)は,コシヒカリに比較して初星は,高温条件下で弱勢花の粒重増加が早いこと,その結果穎果間での光合成同化産物の競合を助長し,白未熟粒の発生を助長した可能性を指摘した.また,Fitzgerald と Resurreccion(2009)は,多収インディカ品種である IR8 と IR60 を比較した結果,両品種間で,高温条件下での弱勢花の登熟歩合が異なること,弱勢花の登熟歩合が高い IR8 で白未熟粒の発生が多いことを示した.本研究の結果からも,コシヒカリでは強勢花に優先して分配が行なわれたのに対し,初星では明確な傾向が無いことを示唆する.これらのことから,高温条件下の初星で白未熟粒の発生が多い要因として,強勢花や弱勢花に限らずほぼ同時に光合成同化産物が分配されることによる競合が考えられた.

4.4 要旨

水稲において,登熟期の高温条件が穂への炭素転流に与える影響を検討

するため,安定同位体炭素(^{13}C)を,直接植物体に暴露する実験を行なった.登熟期の高温条件に対する耐性が低い「初星」と,やや強から中である「コシヒカリ」を用い,白未熟粒発生程度と ^{13}C の各器官における存在量とを検討した.その結果,高温条件での白未熟粒の発生は,初星の弱勢花で多かった.玄米あたりの全炭素量は,同量であればコシヒカリより初星で白未熟粒の発生が多いことから,初星はより多く炭素の転流が必要であった.穂内での ^{13}C の存在位置を検討するため,穂上部の ^{13}C 量を穂下部の ^{13}C 量で除した数値を検討したところ,無処理区では両品種ともほぼ 1.0 と変わらなかったものの,高温区ではコシヒカリが 1.3 と穂上部での量が高かった.一方,初星は無処理区と同様に 1.0 と,穂の上部,下部とも同等に炭素の転流がされた.以上から,高温条件下で光合成産物の穂への転流が抑制されることが,白未熟粒の発生原因と考えられた.

図　表

表 3-1　出穂期,成熟期と試験処理条件

品種	区名	出穂期	加温処理開始	^{13}C 処理日	成熟期
初星	高温区	8/18	8/24	9/2	9/27
	無処理区			9/3	9/28
コシヒカリ	高温区	8/23	8/29	9/7	10/3
	無処理区			9/8	10/5

高温区は,出穂後 6 日目から無加温ガラス室内で栽培したもの.

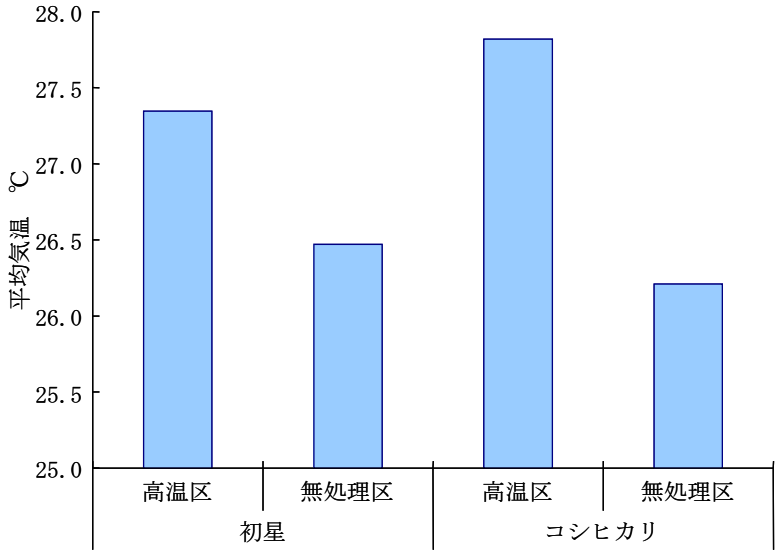

図 3-1 出穂後 20 日間の平均気温
高温区は, 出穂後 7 日目から無加温のガラス温室に移動したもの.

表 3-2　品種と加温処理が玄米外観品質に与える影響

品種	処理	部位	整粒	未熟粒	未熟粒				
					背白粒	基白粒	乳白粒	腹白粒	心白粒
初星	高温	穂上部	64.6	29.3	1.8	5.8	0.4	0.0	0.9
		穂下部	47.1	42.2	4.9	9.1	0.3	0.5	0.2
	常温	穂上部	74.0	19.1	2.7	5.0	0.0	0.2	1.4
		穂下部	65.9	25.9	1.9	2.6	0.8	0.0	1.8
コシヒカリ	高温	穂上部	70.1	24.1	0.3	1.4	1.4	0.0	0.0
		穂下部	57.7	32.7	0.5	3.2	1.8	0.0	0.1
	常温	穂上部	65.4	23.0	0.1	0.4	0.1	0.0	0.0
		穂下部	57.4	26.9	0.5	1.0	0.3	0.0	0.0
分散分析	品種		ns	ns	**	**	ns	ns	ns
	処理		ns	*	ns	*	*	ns	ns
	部位		**	*	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×処理		*	ns	ns	ns	*	ns	ns
	品種×部位		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	処理×部位		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×処理×部位		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	誤差		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	全体		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

単位は粒数比(%).玄米外観品質は,穂上部(強勢花)と穂下部(弱勢花)で分け,品質判定機(静岡精機製,RS2000)で整粒,未熟粒,に区分けした後,未熟粒について目視で判定した.

表 3-3　品種と加温処理が吸収された ^{13}C 量に与える影響

品種	処理	生育ステージ	^{13}C量(mg)				
			全体	根	葉	茎	穂
初星	高温	feed直後	369.6	2.6	193.4	53.0	120.6
		成熟期	298.6	2.1	5.6	14.8	276.1
	無処理	feed直後	381.6	4.2	188.5	66.7	122.2
		成熟期	317.0	2.4	4.3	16.0	294.3
ｺｼﾋｶﾘ	高温	feed直後	456.5	1.5	234.2	92.9	127.8
		成熟期	312.2	2.6	3.5	13.8	292.3
	無処理	feed直後	497.6	6.6	265.4	93.2	132.4
		成熟期	380.8	1.2	2.4	12.7	364.6
分散分析	品種		**	ns	**	**	ns
	処理		ns	*	ns	ns	ns
	生育ステージ		**	**	**	**	**
	品種×処理		ns	ns	ns	ns	ns
	品種×生育ステージ		ns	ns	**	**	ns
	処理×生育ステージ		ns	**	ns	ns	ns
	品種×内容×生育ステージ		ns	*	ns	ns	ns

計測は Termo 社製同位体質量分析機で行なった.サンプル収集日は表 3-1 のとおり.

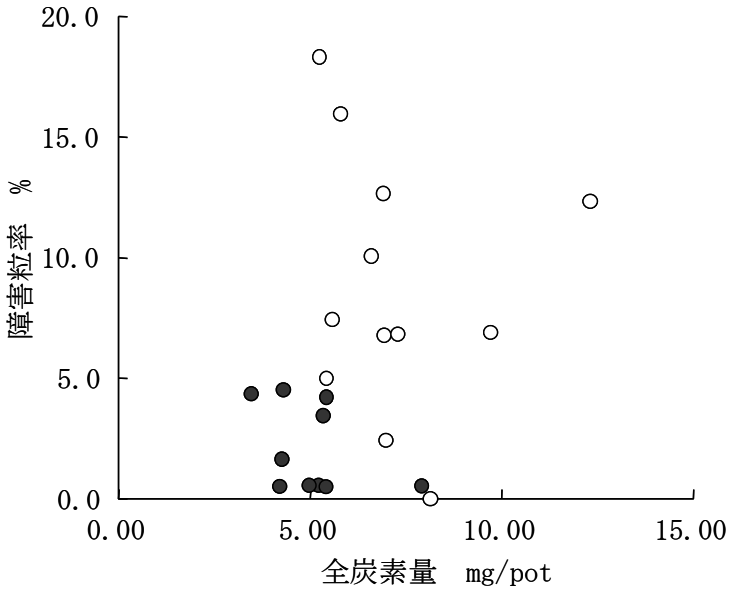

図 3-2 玄米全炭素量と障害粒発生の関係
障害粒率は,背白粒率と基白粒率を加えた値.全炭素量は,成熟期の玄米における値.●,コシヒカリ ;○,初星.

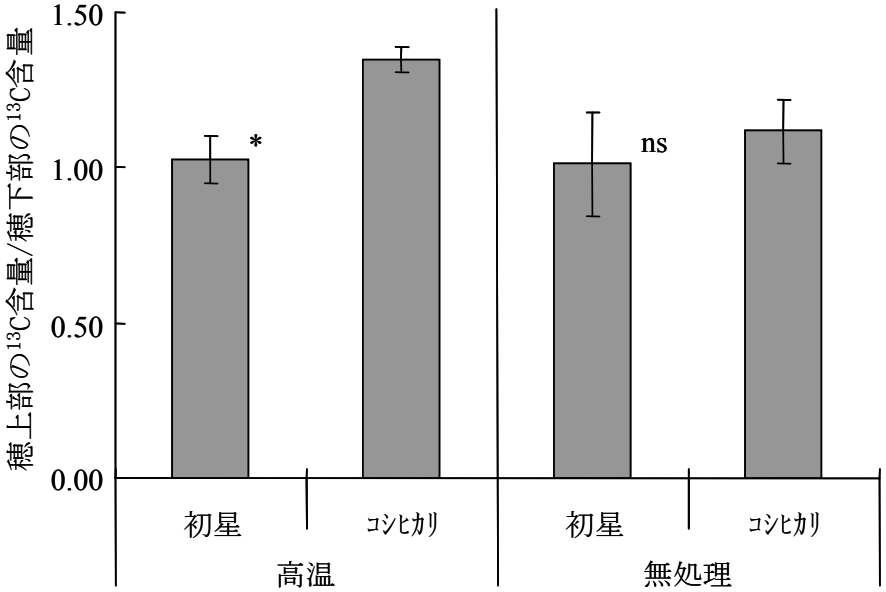

図 3-3 品種の違いが穂内の ^{13}C 存在位置に与える影響
*と ns は, 両品種間にそれぞれ 5%水準で有意差有りと有意差が無いことを示す(t 検定). 縦線は標準誤差を表す.

第五章

総合考察と結論

総合考察

本研究では,新たな白未熟粒抑制技術として,深水かんがいと不耕起V溝直播栽培を組み合わせた「深水無落水栽培」が有効であることを証明するとともに,この白未熟粒の発生を抑制する効果が植物体の窒素含量の増加による光合成活性の向上に起因すること,逆に光合成産物が減少すると白未熟粒の発生が促進されることを明らかにしようとした.

第二章では,省力的でかつ作業能率の高い直播栽培方法である,「不耕起V溝直播栽培」と20cm程度の湛水深を維持する「深水かんがい」を組み合わせた,「深水無落水栽培」について,白未熟粒抑制効果の検証と,他の栽培方法と比較した場合の優位性について検討した.千葉ら(2009)は移植栽培で,深水かんがいにより白未熟粒の発生が抑制されること,大江と三本(2002)により提唱された手法,「分げつ盛期に水位を主茎展開葉の葉鞘に合わせ10日程度深水処理を行う」により白未熟粒の発生を抑制する効果を得たことを報告している.また,大江と三本(1998)は,深水かんがいの処理時期が分げつ盛期から最高分げつ期であれば,倒伏が発生することなく,有効系歩合を向上させ増収効果が期待できるが,これを超えると生育制御効果が得られない場合や倒伏が発生することを報告している.しかし,実際の営農場面では,分げつ盛期を判断することは難しい.特に,作物を専業とする農家は多くの圃場(面積のみならず筆数)を経営しているため,営農技術とするためには,処理法が簡単であるばかりでなく,技術の適用判断が簡易であること,作業手順が少ないことが普及するための条件となる.また,移植栽培を前提とした深水栽培は,「中干し」が必須であるため深水処理を

行ったかんがい水を全て水田外へ落水しなければならず,水資源の有効利用の点からも生産現場には取り組みにくい手法となっている.

一方,本研究の結果では深水無落水栽培は,不耕起V溝直播栽培の入水時(葉齢3前後)から成熟期直前(成熟期前5日程度)までの長期にわたり20 cmの湛水深を維持するにも関わらず,倒伏や減収が認められなかった.さらに,試験を実施した3年間でかつ複数の試験系において安定して白未熟粒が抑制されことから,深水無落水栽培は白未熟粒抑制技術として有望であると結論付けられた.

次に,第三章では,植物体窒素濃度,植物体の表面温度,気孔コンダクタンス,光合成速度を直接測定して,実際に深水無落水栽培で光合成活性が高く維持されているか検証した.葉の窒素濃度を計測した結果,深水区は慣行区に比較して穂形成期以降有意に高かった.千葉ら(2011)は,穂揃い期における葉身の窒素濃度と登熟期間における葉面積が向上することから,深水かんがいにより光合成能が向上することを示唆したが,直接光合成に関わる形質について検討は行なわれなかった.

気孔コンダクタンスと光合成速度を検討した結果,深水区は慣行区に比較して登熟期で高かったことから,深水かんがいで外観品質が向上する要因であることを実証した.なお,深水区で穂数が減少するものの,一穂あたりの籾数が増加するため,収量は慣行区と変わらなかった.大江・三本(1999)は深水処理により,主茎の乾物増加速度が向上することを示している.このように,深水処理により一穂あたりの乾物生産量が向上する要因として,この光合成活性の高さが考えられた.

第四章では,光合成産物の穂への転流が高温によって阻害されることによって白未熟粒の発生が助長されるとの仮説を証明するために,白未熟粒の発生程度が異なる 2 品種(コシヒカリと初星)を用い,炭素の安定同位体(^{13}C)によるトレーサー試験を行なった.

その結果,初星の弱勢花が多いと考えられる穂下部で,高温による基白粒等の白未熟粒の発生が多かった.さらに,成熟期の ^{13}C 量について穂下部を穂上部で除した値は,初星がコシヒカリより低かった.このことは,光合成産物がコシヒカリでは,弱勢花が多い穂下部に比べ強勢花が多い穂上部に優先して分配されたのに対し,初星では穂上部と下部間で分配の顕著な差異が無いことを示している.炭素転流が少なかったと考えられた初星の穂下部で白未熟粒の発生が多かったことから,当初想定した仮説,「光合成産物の穂への転流が高温によって阻害されることによって白未熟粒の発生が助長される.」が証明できた.

ここで,深水無落水栽培の優位性を検討するために,他の白未熟粒抑制手法との比較を行ないたい.

移植栽培を前提とした「深水かんがい」との比較は前述した.これ以外の水管理法として,生育期間中のかんがい水の「かけ流し」がある(荒井と伊藤 2001,中村ら 2003,坂田ら 2005).かけ流しにより地温の上昇を抑制する方法であるが,水温が低い場合では有効であるものの,高い場合は白未熟粒抑制が十分でない場合がある(坂田ら 2005).また,用水量が多く必要であり,水資源の有効利用の点から実用化は難しいと考える.また本研究の結果からは,水温や地温等の微気象が水稲の穂温や葉温に影響を与えると

は考えられず,白未熟粒を抑制するメカニズムについて検討する必要がある.

また,現在,多くの研究機関で検討されている白未熟粒抑制技術は,生育後半に窒素肥料の施用量を増加させる方式である(西端ら 2001,川村と石塚 2004,野村ら 2004,吉野ら 2007,坂田ら 2008,杉浦ら 2008).しかし,同じ品種「コシヒカリ」を対象としても,施肥量や使用する肥料の種類等が,研究により異なる(西端ら 2001,野村ら 2004,永畠ら 2005,坂田ら 2005,吉野ら 2007,坂田ら 2008,杉浦ら 2008).このことは,窒素施肥による効果が圃場の土壌条件や気象条件に大きな影響を受けるため,栽培地域毎に適用する手法を検討する必要があることを意味している.すなわち,新しい栽培条件に対応するためには,改めて施用法について検討が必要であり,広域適用性が低いと考えられる.

次に,特に北陸地方で取り組まれている移植時期の移動について検討したい(舩場ら 1997,山口ら 2004,守田ら 2009).これは,登熟期間が高温条件とならない作期に栽培期間を移動させる方法で,北陸地方ではコシヒカリを対象に移植を5月上旬から5月中旬へ遅らせることが行なわれている(高橋 2007).しかし,この方法は気温の高い時期と水稲の登熟期間との「タイミングをずらす」方法であり,気象条件が変動すると効果が得られなくなる可能性がある.特に,本県のような温暖地のコシヒカリでは,5 月下旬に移植を行なっても出穂期が 8 月上旬であり,登熟期間が高温条件となる(濱田ら 1991)ため効果は少ないと考えられる.また,移植期を遅くすることは,単位面積あたり籾数を減少させる効果もあるが(山口ら 2004,

守田ら 2009),条件によっては減収を招く可能性がある.

他にも栽植密度を減らし単位面積あたり籾数を減少させる方法があるが(高橋 2004),これも移植期を遅くする方法と同様に,条件によっては減収する可能性がある.

本研究から,深水無落水栽培は高温年であった 2008 年と 2010 年,低温年であった 2009 年(杉浦ら 2010,林ら 2011)でも白未熟粒発生を抑制し,かつ減収も認められなかった.このことは,深水無落水栽培が気象条件から受ける影響が少ないことを示唆している.現地での実証試験でも効果が安定していることから(林 2011),土壌条件の影響も少ないと考えられる.これらから,深水無落水栽培は広域適用性を有する白未熟粒抑制栽培法と判断され,他の手法より有効と考えられる.なお,省力的な直播栽培を前提とした白未熟粒抑制法は開発されておらず,この点からも他の手法に比較して優れていると考えられる.

さらに,深水無落水栽培の白未熟粒抑制効果は,植物体の窒素濃度が向上することによる光合成活性の高さによると結論付けた.本研究から,深水無落水栽培の白未熟粒発生抑制効果は,ソース能の向上であることが明らかになった.なお,千葉ら (2011)も同様の結論に至っているが,登熟期間における葉の窒素濃度や葉面積からの推論である.本研究は,葉の窒素濃度だけでなく,葉の気孔コンダクタンスや光合成速度について検討した結果であり,より直接的に証明できたと考えられる.

最後に,登熟期高温条件による白未熟粒の発生に関する品種間差異の要因について,弱勢花への光合成産物の転流を示した.従来の研究から,品種

により高温条件下で白未熟粒の発生が多い弱勢花(Cheng ら 2007,大谷と吉田 2008)への転流が異なることが示されている(佐々木ら 2008,2009,Fitzgerald と Resurreccion 2009).しかし,これらの研究は穂の着生位置毎に,登熟期間の粒重(佐々木ら 2008,2009)や,枝梗毎の登熟歩合(Fitzgerald と Resurreccion 2009)により検討されている.今回の研究では,^{13}C でラベルした炭素の動態を検討することで,より直接的に証明ができたと考えられる.

以上から,本研究の目的である白未熟粒抑制技術として,深水かんがいと不耕起 V 溝直播栽培を組み合わせた「深水無落水栽培」が有効であることを証明するとともに,この白未熟粒の発生を抑制する効果が植物体の窒素含量の増加による光合成活性の向上に起因すること,反対に光合成産物の減少により白未熟粒の発生が促進されることについて明らかにすることができたと判断される.

今後の課題と展望

大江と三本 (1999)は,深水かんがいによって一穂あたりの乾物生産性が向上することを報告した.千葉ら (2009)は深水栽培では,一般に認められる一穂もみ数と登熟歩合との間のトレードオフが認められないことを報告した.本研究でも,深水区で一穂もみ数と登熟歩合との間でトレードオフの関係が認められなかった.このトレードオフが発生しなかった原因として,深水区で光合成速度が高く,一穂あたりの乾物生産性が向上したことが考えられた.三王ら (2002)は,多収品種タカナリを用いた研究の結果から

個体群の受光体制を向上させることで乾物生産量が高くなること,乾物生産量が多いと一穂もみ数と登熟歩合との間のトレードオフが認められないことを示した.これらは,光合成活性が十分に高ければ,もみ数を多くするほど収量が向上することを示唆する.濱田ら（2008)は,単収が高いオーストラリアの栽培法の特徴として,たん水深が深いこと,施肥量と播種量が多いことを示した.これから,深水栽培で抑制された茎数を苗立ち数でカバーすることで多収が可能となることが推察できる.そこで,今後,増収技術としての深水無落水栽培について研究を行なう必要がある.

また,深水区で植物体の窒素濃度が向上したが,原因は明確にできなかった.Won ら（ 1999)や佐藤ら（ 2004)は深水処理による茎数が抑制され,その結果植物体窒素濃度が向上したと推察した.本研究でも,深水区で茎数が抑制されたことから,これが植物体窒素濃度を向上させたと考えた.しかし,深水処理により根からの窒素吸収が向上する可能性を否定しきれない(Won ら 1999).かんがい水深と肥料の利用効率との関係を解明する等,深水処理で植物体窒素濃度が向上する要因を詳細に検討する必要がある.

本研究は,愛知県で特に白未熟粒の発生が問題されている「コシヒカリ」を対象にした.IPCC（ 2007)は,今後,地球温暖化が更に進行するとしている.このことは,現在,本県で問題視されているコシヒカリの属している作期以外でも,今後,登熟期の高温に起因する白未熟粒が発生することを示している.実際に,2010 年はコシヒカリより遅い熟期の品種で白未熟粒が多発し,外観品質が低下した(林ら 2011).今後は,このような遅い作期においても,夏季の高温による白未熟粒の発生への対応策を検討する必要があ

る.

登熟期間の高温による白未熟粒の発生に関する品種間差異の発生要因については不明な点が多い(森田 2008).品種の系譜を遺伝的に検討した結果から,若松ら (2007)は低い高温耐性を「喜峰」に,西村ら (2000)は高い高温耐性を「上州」や「亀の尾 4 号」にその遺伝的要因があることを指摘した.このことは,高温耐性についても,母本の形質が後代系統に遺伝することを示している.なお,船生ら (2006)は高温条件下でも白未熟粒の発生が少ない水稲系統「TS-3」を見出し,今後の耐性品種の母本になりうることを示している.さらに,杉浦ら (2011)は,水稲品種「みねはるか」が,コシヒカリと比較して,白未熟粒の発生が少ないこと,基部未熟粒の発生に影響を与えると考えられる葉身窒素含量や,茎の非構造性炭水化物濃度,登熟期における止葉の気孔抵抗値に差がないことを示している.これら品種・系統について,Fitzgerald と Resurreccion (2009)が多収インディカ品種 IR60 で認めた高温条件化での弱勢花の登熟歩合低下が観察された.この現象について,登熟期間を通し強勢花と弱勢花に分けた粒重の推移等更なる調査を行い,高温条件下での白未熟粒発生低下の要因であるか検証する必要がある.

引用文献

Adu-Kwarteng, E., Ellis, W.O., Oduro, I. and Manful, J.T. 2003. Rice grain quality: a comparison of local varieties with new varieties under study in Ghana. *Food Cont.* 14:507-514.

Ahmad, S., Zia-Ul-Haq, M., Ali, H., Ahmad, A., Khan, M. A., Khaliq, T., Husnain, Z., Hussain, A. and Hoogenboom, G. 2009. Morphological and quality parameters of *Oryza Sativa* L. as affected by population dynamics, nitrogen fertilization and irrigation regimes. *Pak. J. Bot*. 41: 1259-1269.

愛知県農業総合試験場 2007. 不耕起 V 溝直播栽培の手引き(改訂第4版). 42-43.

荒井邦夫・河野恭広 1978. 水稲の穂の発育に関する研究　第2報 穂上位置別頴果の窒素集積パターンに及ぼす出穂期窒素追肥の影響. 日作紀 48：335-342.

荒井正雄・宮原益次 1956. 水稲の本田初期深水灌漑による雑草防除の研究. 日作紀 24:163-165.

荒井義光・伊藤博樹 2001. 高温登熟時の用水掛け流し処理による水田地温の低下と玄米品質の向上. 日作東北支部報 44：89-90.

Arai-Sanoh, Y., Ishimaru, T., Ohsumi, A. and Kondo, M. 2010. Effects of soil temperature on growth and root function in rice. *Plant Prod. Sci.* 13: 235-242.

Australian Bureau of Statistics. 2010. Agricultural commodities, Australia, 2008-09.[Online].http://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/Latestproducts/7121.0Main%20Features32008-09?opendocument&tabname=Summary&prodno=7121.0&issue=2008-09&num=&view=

Cheng, F., Liu, Y., Liu, Z., Zhao, N., Wang, F., Zhang, Q. and Zhang, G. 2007. Positional variations in chalky occurrence within a rice panicle and its relation to grain nutritional quality. *Aust. J. Agri. Res.* 58: 95-103.

Cheng, F. M., Zhong, L.J., Wang,F. and Zhang, G. P. 2005. Differences in cooking and eating properties between chalky and translucent parts in rice grains. *Food Chem.* 90: 39-46.

Cheng, W., Zhang, G., Zhao, G., Yao, H. and Xu, H. 2003. Variation in rice quality of different cultivars and grain positions as affected by water management. *Field Crops Res.* 80:245-252.

千葉雄大・松村修・寺尾富夫 2008. 深水栽培による米粒品質向上要因(3)分げつ間競合が白未熟粒発生に及ぼす影響について. 日作紀 77(別1):154-155.

千葉雄大・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－深水栽培が水稲の生育と米粒外観品質に及ぼす影響－. 日作紀 78：455-464.

千葉雄大・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.

Cooper, N. T. W., Siebenmorgen, T. J. and Counce, P. A. 2008. Effects of nighttime temperature during kernel development on rice physicochemical properties. *Cereal Chem.* 85: 276-282.

蛯谷武志・山本良孝・矢野昌裕・舟根 政治 2008. 染色体断片置換系統群を利用したイネの玄米外観品質に関与する QTL の検出. 育種学研究 10：91-99.

Fitzgerald, M. A. and Resurreccion, A. P. 2009. Maintaining the yield of edible rice in a worming world. Func. *Plant Biol.* 36:1037-1045.

深井周 1990.オーストラリアにおける作物研究の動向。日作紀 59:595-599.

船生岳人・加藤恭宏・中村充 2006.高温登熟条件下で栽培した水稲品種における玄米品種低下程度の比較.育種学研究 8(別 1)：179.

古谷勝司・椛木信幸・児嶋清 1991. 水稲栽培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. 北陸農業試験場報告 33：29-53.

濱田千裕・野々山利博・釋一郎・小島元・中嶋泰則・友松啓二・加藤裕司 1991.水稲の生育予測診断技術(第 3 報)発育速度の概念に基づく生育ステージ予測システムの試作.愛知農総試研報 23:67-81.

濱田千裕 2004. 不耕起 V 溝直播栽培の開発と普及(水稲直播栽培のこの 10 年と今後). 北陸作物学会報 39：102-104.

濱田千裕・中嶋泰則・林元樹・釋一郎 2007.水稲における不耕起 V 溝直播栽培の開発－「冬季代かき」による栽培の安定化－.日作紀 76:508-518.

濱田千裕・Graeme D Batten・Judith M Dunn・谷俊男・井沢敏彦・釋一郎 2008.水稲の不耕起 V 溝直播栽培の収量性評価－オーストラリア及び日本における収量性の比較－.日作紀 77：22-32.

Hayashi, M., Sugiura, K., Kuno, C., Endo, I., Tanaka, Y. and Yamauchi, A. 2011. Rice chalky grain reduction with deep and permanent irrigation method, Effect on growth and grain quality of rice. *Plant Prod. Sci.* (under review).

林元樹・杉浦直樹・本庄弘樹 2011. 2010 年夏季の高温が愛知県の水稲玄米外観品質に与えた影響. 関東東海北陸農業研究成果情報(予定).

He. P., Li, S. G., Qian, Q., Ma, Y. Q., Li, J. Z., Wang, W. M., Chen,Y. and Zhu, L. H. 1999. Genetic analysis of rice grain quality. *Theor. Appl. Genet.* 98: 502-508.

Hirano, T., Uchida, N., Azuma, T. and Yasuda, T. 1996. Effect of submergence on distribution of photoassimilates and activities of sucrose metabolizing enzymes in sink organs of floating rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 65: 540-548.

Hirasawa, T., Ozawa, S., Taylaran, D. and Ookawa, T. 2010. Varietal differences in photosynthetic rates in rice plants, with special reference to the nitrogen content of leaves. *Plant Prod. Sci.*13: 53-57.

Hirokawa, T., Itoh, S. and Kitagawa, Y. 1992. Nitrogen uptake by rice plants at gravelly gray lowland soil rotated from upland fields for a long period. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 63:550-558.

星豊一・中村恭子・東聡志・小林和幸・石崎和彦・阿部 聖一 1996. 新潟県の水稲歴代主要奨励品種の高温登熟下における玄米品質及び食味. 北陸作物学会報 31：8-10.

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稲における玄米品質低下程度の比較. 日作紀 71：174-177.

飯田雄亮・塚口直史 2006. 水稲穎花への同化産物供給量の違いが高温による玄米千粒重および外観品質低下に及ぼす影響. 日作紀 75(別 1)：382-383.

井手一浩・徳安雅行・下村 忠夫 1971. 後期追肥重点施肥法と収量および玄米の品質との関係について. 日本土壌肥料学会講演要旨集 17：150.

IPCC 2007. 地球温暖化第四次レポート. 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省訳. 中央法規出版. 東京. P2.

石原邦・飯田修・平沢正・小倉忠治　1979a. 水稲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.

石原邦・黒田栄喜・石井龍一・小倉忠治　1979b. 水稲葉身の窒素濃度と光合成速度との関係－同化箱法と酸素電極を用いての比較－. 日作紀 48：551-556.

石原邦・斉藤邦行　1987. 湛水状態の水田に生育する水稲の個葉光合成速度の日変化に影響する要因について. 日作紀 56：8-17.

Ishimaru, T., Horigane, A. K., Ida, M., Iwasawa, T., San-oh, Y. A., Nakazono, M., Nishizawa, N. K., Masumura, T., Kondo, M. and Yoshida, M. 2009. Formation of grain chalkiness and changes in water distribution in developing rice caryopses grown under high-temperature stress. *J. Cereal Sci.* 50: 166-174.

石崎和彦 2006. 水稲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.

Ito, S., Hara, T., Kawanami, Y., Watanabe, T., Thiraporn, K., Ohtake, N., Sueyoshi, K., Mitsui, T., Fukuyama, T., Takahashi, Y., Sato, T., Sato, A. and Ohyama, T. 2009. Carbon and nitrogen transport during grain filling in rice under high-temperature conditions. *J. Agron. Crop Sci.* 195: 368–376.

岩下友記・新屋明・山川恵久・土井修・上原裕美・鳥山国士 1973. 水稲の

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.

岩渕哲也・田中浩平・尾形 武文・浜地 勇次 2003. 近年の夏期高温が移植時期の異なる水稲「夢つくし」の外観品質に与える影響. 日作九支報 69：11-13.

Jones, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agric. Forest Meteorol.* 95: 139-149.

重山博信・伊藤喜美子・阿部聖一・小林和幸・平尾賢一・松井崇晃・星 豊一 1999. 新潟県における水稲品種の品質・食味の向上 ： 第 16 報 水稲の高温水かんがいによる高温登熟性の検定. 北陸作物学会報 34:21-23.

金田吉弘・加藤雅也・佐山玲・保坂学 2004. 高温登熟期の節水管理は黒点症状米の発生を助長する. 日作東北支部報 47：13-15.

金田吉弘・高橋大悟・佐藤孝 2008. 重粘土水田における亀裂生成が水稲の水分吸収および収量・品質に及ぼす影響. 土肥誌 79：454-460.

川村富輝・石塚明子 2004. 水稲品種‘つやおとめ’の高品質良食味および安定多収のための窒素施用法. 福岡県農業総合試験場研究報告 23：15-20.

河津俊作・本間香貴・堀江武・白岩立彦 2007. 近年の日本における稲作気象の変化とその水稲収量・外観品質への影響. 日作紀 76：423-432.

木戸三夫・梁取昭三 1968. 腹白，基白，心白状乳白，乳白米の穂上における着生位置と不透明部のかたちに関する研究. 日作紀 37：534-538.

桐山隆・中谷治夫 1987. 深水管理と水稲後期の生育. 北陸作物学会報 22：11-12.

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米発生. 日作紀 73：315-322.

小出俊則・高松美智則・伊藤幸司・吉田朋史 1997. 不耕起乾田直播栽培における水稲の生育特性. 愛知農総試研報 29:27-32.

小出俊則・谷俊男・林元樹・平岩確・野村有美・杉浦和彦・小西敏郎・加藤満・田中義信・久保田重正・片岡幸次・遠藤征馬・上田幸治・落合敏弘 2006. V 溝直播栽培コシヒカリは高温登熟条件下でも移植栽培より高い整粒歩合を確保できる. 関東東海北陸農業研究成果情報.

小牧有三・太田久稔・福井清美・上原泰樹 2000. 高温登熟条件の違いによる水稲品種の玄米品質の差異. 北陸作物学会報 35：10-12.

小牧有三・笹原英樹・上原 泰樹 2002. ビニルハウスによる高温条件下での登熟に関する早生水稲の品種間差. 北陸作物学会報 37：12-16.

近藤始彦・石丸努・三王裕見子・梅本貴之 2005. イネの高温登熟研究の今後の報告. 農業技術 60:462-470.

近藤始彦 2006. 米の品質とイネの栄養・環境生理. イネの生産性・品質と栄養生理. 日本土壌肥料学会編. 博友社. 東京. p99-120.

Kouchi, H. and Yoneyama, T. 1984a. Dynamics of carbon photosynthetically assimilated in nodulated soya bean plants under steady-state conditions. 1. Development and application of $^{13}CO_2$ assimilation system at a constant ^{13}C abundance. *Ann. Bot.* 53: 875-882.

Kouchi, H. and Yoneyama, T. 1984b. Dynamics of carbon photosynthetically assimilated in nodulated soya bean plants under steady-state conditions. 2. The incorporation of ^{13}C into carbohydrates, organic acids, amino acids and some storage compounds. *Ann. Bot.* 53: 883-896.

Kouchi, H., Nakaji, K., Yoneyama T. and Ishizuka, J. 1985. Dynamics of carbon photosynthetically assimilated in nodulated soya bean plants under steady-state conditions. 3. Time-course study on ^{13}C incorporation into soluble metabolites and respiratory evolution of $^{13}CO_2$ from roots and nodules. *Ann. Bot.* 56: 333-346.

香村敏郎・高松美智則・芳賀光司・朱宮昭男・釋一郎・谷口学・田辺潔・伊藤俊雄 1977. 水稲新品種「初星」の育成. 愛知農総試研報 A9：1-11.

黒木智・永吉嘉文・藪押睦幸・中原孝博・齋藤葵・川口満 2009. 暖地水稲における登熟期間の止葉葉色と白未熟発生との関係. 日作紀 78(別 1)：56-57.

Leinonen, I., Grant, O. M., Tagiliavia, C. P. P., Chaves, M. M. and Jones, H. G. 2006. Estimating stomatal conductance with thermal imagery. *Plant, Cell and Environ.* 29: 1508–1518.

Lin, C. J., Li, C. Y., Lin, S. K., Yang, F. H., Huang, J. J., Liu, Y. H. and Lur, H. S. 2010. Influence of high temperature during grain filling on the accumulation of storage proteins and grain quality in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Agric. Food Chem.* 58: 10545-10552.

Lin, S. K., Chang, M. C., Tsai, Y. G. and Lur, H. S. 2005. Proteomic analysis of the expression of proteins related to rice quality during caryopsis development and the effect of high temperature on expression. *Proteomics* 5: 2140-2156.

Makino, A., Mae, T. and Ohira, K. 1987. Variations in the contents and kinetic properties of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylases among rice species. *Plant Cell Physiol.* 28: 799-804.

Makino, A. 2003. Rubisco and nitrogen relationships in rice: Leaf photosynthesis and plant growth. *Soil Sci. Plant Nutr.* 49:319-327.

松村修 2005.高温登熟による米の品質被害ーその背景と対策ー. 農業技術 60：437-441.

松村修 2007.高温登熟被害の発生要因.高温登熟に強いイネ.日本作物学会北陸支部・北陸育種談話会編.養賢堂.東京.p1-10.

松村修 2008.米品質に及ぼす作土深と根活性の影響について.日作紀 77(別2)：14-15.

松島正博 1988. オーストラリアの米産業。家の光協会、東京。p10-19.

松島省三・松崎昭夫・富田 豊雄 1970. 水稲収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究:第 101 報 水稲個体群の葉色表示法について(1). 日作紀 39：231-236.

宮野法近・国分牧衛 2009.宮城県における水稲玄米品質低下要因の解析-気象要因の影響について-.日作紀 78：225-233.

森田敏 2000. 高温が水稲の登熟に及ぼす影響 ： 作期移動実験と標高の異なる地点へのポット移動実験による解析.日作紀 69：400-405.

森田敏・白土宏之・高梨純一・藤田耕之輔 2004. 高温が水稲の登熟に及ぼす影響 ： 穂・茎葉別の高夜温・高昼温処理による解析.日作紀 73:77-83.

森田敏 2005. 水稲の登熟期の高温によって発生する白未熟粒，充実不足および粒重低下. 農業技術 60：442-446.

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.

中川博視・白川美翠・永畠秀樹 2006.炭水化物供給可能量と穂揃期窒素追肥がイネの白未熟粒の発生に及ぼす影響.日作紀 75(別 2)：12-13.

永畠秀樹・黒田晃 2004. 高温処理が早生水稲の白未熟粒発生および食味関連形質に与える影響. 北陸作物学会報 39：81-84.

永畠秀樹・山元皓二 2005. 温度勾配ビニルハウスを用いた水稲の高温登熟性の評価. 育種学研究 7：95-101.

永畠秀樹・島健二・中川博視 2006.水稲白未熟粒発生のモデルと予測化に関する研究　1.乳白粒簡易発生予測モデル.日作紀 75(別 2)：18-19.

永畠秀樹・山村達也・塚口直史・蛯谷武史・中川博視2009.イネ染色体断片置換系統群を用いた乳白粒の発生に関与するQTLの検出. 日作紀78(別2)：52-53.

Nakagawa, H., Yamagishi, J., Miyamoto, N., Motoyama, M., Yano, M. and Nemoto, K. 2005. Flowering response of rice to photoperiod and temperature: a QTL analysis using a phenological model. *Theor. Appl. Genet.* 110: 778–786.

中鉢富夫・浅野岩夫・及川勉 1986. 葉緑素計による水稲(ササニシキ)の窒素栄養診断. 土肥誌 57：190-193.

中村啓二・橋本良一・永畠秀樹 2003.登熟期間の水管理の違いが胴割米・

乳白粒の発生に及ぼす影響. 北陸作物学会報 38：18-20.

Nagarajan, S., Jagadish, S.V.K., Hari Prasad, A.S., Thomar, A.K., Anand, A., Pal, M. and Agarwal, P.K. 2010. Local climate affects growth, yield and grain quality of aromatic and non-aromatic rice in northwestern India. *Agric. Ecosys. and Environ.* 138 :274–281.

長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期の高温が頴果の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀 34：59-66.

Nagato, K. and Chaudhry, F. M. 1969. Ripening of *japonica* and *indica* type rice as influenced by temperature during ripening period. *Proc. Crop Sci. Soc. Jpn.* 38: 657-667.

南雲芳文・土田徹・市川岳史・東聡志 2010. 高品質米生産のためのコシヒカリ登熟期の水管理の目安. 北陸作物学会報 45：19-21.

錦斗美夫・長谷川愿・芳賀静雄・神保惠志郎 1987. 水稲生育相に及ぼす深水管理の影響. 山形農試研報 22:31-54.

西端善丸・牧田康宏・伊森博志 2001. コシヒカリの全量基肥施肥法による乳白粒の発生軽減と玄米品質の向上. 福井県農業試験場研究報告 38：41-46.

西村実・梶亮太・小川紹文 2000. 水稲の玄米品質に関する登熟期高温ストレス耐性の品種間差異. 育種学研究 2：17-22.

野村幹雄・高橋渉・荒井清完・守田和弘 2004. 高温条件下における乳白，基白，背白米発生に関する研究　第 2 報　追肥方法が生育中後期の栄養状態に及ぼす影響. 日作紀 73(別 2):284-285.

Okawa, S., Makino, A. and Mae, T. 2003. Effect of irradiance on assimilated carbon during the early phase of grain filling in rice. *Ann. Bot.* 92: 357-364.

表野元保・小島洋一朗・蛯谷武志・山口琢也・向野尚幸・山本良孝 2003a. 人工的高温条件下における水稲の登熟性検定法. 北陸作物学会報 38：12-14.

表野元保・小島洋一朗・蛯谷武志・山口琢也・向野尚幸・山本良孝 2003b. 2001 年の気象経過に基づく基白粒および背白粒の発生要因の解析. 北陸作物学会報 38：15-17.

表野元保・蛯谷武志・山口琢也・宝田研・向野尚幸・山本良孝 2004. 人工的高温条件下における水稲の登熟性検定法 ： 第 2 報 効率的高温処理期間の検討. 北陸作物学会報 40：24-27.

Oh-e, I., Saitoh, K.and Kuroda, T. Effects of high temperature on growth, yield and dry-matter production of rice grown in the paddy field. *Plant Prod. Sci.*10: 412-422.

大江真道・後藤雄佐・星川清親 1994. 深水処理が水稲分げつの発生に及ぼす影響. 日作紀 63：576-581.

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稲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 1999. 深水処理による日本型水稲の乾物生産特性の変化. 日作紀 68：482-486.

Ohe, M., Okita, N. and Daimon, H. 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.

Okada, M., Iizumi, T., Hayashi, Y. and Yokozawa, M. 2009. Aclimatological analysis on the recent declining trend of rice quality in Japan. *J. Agric. Meteorol.* 65: 327-337.

岡本正弘・堀野俊郎 1994. 米の窒素含量の品種間差異および栽培条件による変異と葉色との関係. 育種学雑誌 44：177-181.

及川あや・三王(荒井)裕見子・大角壮弘・石丸努・近藤始彦 2008. 出穂期の窒素追肥が背白粒の発生とその動態に及ぼす影響. 日作紀 77(別 1)：146-147.

Ookawa, T., Naruoka, Y., Yamazaki, T., Suga, J. and Hirasawa, T. 2003. A comparison of the accumulation and partitioning of nitrogen in plants between two rice cultivars, Akenohoshi and Nipponbare, at the ripening stage. *Plant Prod. Sci.* 6:172-178.

大谷和彦・吉田智彦 2008. 送風時期が水稲「白未熟粒」発生に及ぼす影響. 日作期 77：434-442.

Pantindol, J. and Wang, Y. J. 2003. Fine structures and physicochemical properties of starches from chalky and translucent rice kernels. *J. Agric. Food Chem.* 51:2777-2784.

Peng, S., Tang, Q. and Zou, Y. 2009. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod. Sci.* 12:3-8.

食糧庁検査課 2004. 農産物検査手帖. 糧友社, 東京. 71-79.

坂田雅正・高田聖・亀島雅史・山本由徳 2005.穂肥の施用と登熟期間中の水管理が水稲品種コシヒカリの玄米収量および品質に及ぼす影響.日作紀 74(別 2):38-39.

坂田雅正・中西優子・亀島雅史・山本由徳 2008.2007 年台風 4 号(MAN-YI)により高知県早期栽培地帯で発生した極早生水稲の青枯れ被害. 日作紀 77(別 1) : 152-153.

坂田雅正・高田聖・亀島雅史・山本由徳 2008.被覆尿素肥料の穂揃期施用が高温登熟下における水稲品種コシヒカリの玄米収量および品質に及ぼす影響.日作紀 77(別 2)16-17.

三王裕見子・富沢洋平・真野ゆう子・大川泰一郎・平沢正 2002.湛水直播栽培した水稲タカナリの乾物生産特性.日作紀 71 : 317-327.

佐々木康之・阿部聖一・市川岳史 1994.深水管理と中耕処理による水田雑草の防除.新潟農試研報 40:27-39.

佐々木良治・大平陽一・竹田博之 2008. 水稲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.

佐々木良治・大平陽一・竹田博之 2008. 高温条件下で登熟した水稲品種の白未熟粒の発生程度における品種間差異. 日作紀 77(別 1) : 144-145.

佐々木良治・大平陽一・長田健二 2009. 移植時期を異にする水稲品種コシヒカリと初星の粒重および粒重増加速度・期間における穂上位置による差異. 日作紀 78(別 1) : 182-183.

佐藤馨・金和裕・三浦恒子 2004.深水処理時期が水稲の玄米蛋白質含量お

よび品質に及ぼす影響. 日作東北支部報 47:51-53.

佐藤庚・稲葉健五 1973. 高温による水稲の稔実障害に関する研究　第 2 報 穂と茎葉を別々の温度環境下においた場合の稔実. 日作紀 42 : 214-219.

佐藤徳雄・渋谷暁一・三枝正彦・阿部 篤郎 1993. 肥効調節型被覆尿素を用いた水稲の全量基肥不耕起直播栽培. 日作期 62 : 408-413.

She, K. C., Kusano, H., Yaeshima, M., Sasaki, T., Satoh, H. and Shimada, H. 2010. Reduced rice grain production under high-temperature stress closely correlates with ATP shortage during seed development. *Plant Biotech.* 27: 67–73.

菅井恵介・後藤雄佐・斉藤満保・西山岩男1999. 段階的な水位上昇処理が水稲の茎数増加に及ぼす影響. 日作紀68:476-481.

菅井恵介・後藤雄佐・斉藤満保 2000. 段階的な水位上昇処理が水稲分げつの生長に及ぼす影響. 日作紀 70:23-27.

杉浦和彦・林元樹・小出俊則・井上勝弘 2008. 愛知県における 2007 年夏季の高温の影響と今後の課題. 日作紀 77(別 1):370-371.

杉浦和彦・本庄弘樹・林元樹・野々山利博・山内章 2010. 愛知県における登熟期の高温による「コシヒカリ」の外観品質低下は基部未熟粒の発生が要因である. 日作紀 79(別 1) : 168-169.

杉浦和彦・本庄弘樹・林元樹・山内　章 2011. 水稲品種「みねはるか」の高温登熟耐性. 日作紀 80(別 1, 印刷中)

田畑美奈子・飯田幸彦・大澤良 2005. 水稲の登熟期の高温条件下における背白米および基白米発生率の遺伝解析. 育種学研究 7 : 9-15.

田畑美奈子・飯田幸彦・奥野員敏 2008. 根群の一部切除が水稲玄米の外観品質に及ぼす影響. 日作紀 77：198-203.

田中浩平・真鍋尚義 1989. 福岡県における昭和 63 年水稲の移植時期，気象要素と生育・収量・品質. 日作九支報 56：35-38.

高橋渉 2004. 気候温暖化条件化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.

高橋渉 2007. 高温による白未熟粒の発生と登熟期間の葉色の影響. 高温登熟に強いイネ. 日本作物学会北陸支部・北陸育種談話会編. 養賢堂. 東京. p47-58.

Takai, T., Yano, M. and Yamamoto, T. 2010. Canopy temperature on clear and cloudy days can be used to estimate varietal differences in stomatal conductance in rice. *Field Crops Res.* 115: 165–170.

高田聖・坂田雅正・亀島雅史・山本由徳 2007. 高知県における 2006 年産コシヒカリでの白未熟粒の多発要因. 日作紀 76(別 2)：154-155.

高田聖・坂田雅正・亀島雅史・山本由徳 2008. 水稲品種の穂相, 玄米の粒重および粒形と白未熟粒の発生割合との関係. 日作紀 77(別 2)：60-61.

高田聖・坂田雅正・亀島雅史・山本由徳・宮崎彰 2010a. 西南暖地の早期栽培における水稲品種の寡照条件下での高温登熟性の評価法. 日作紀 79:142-149.

高田聖・坂田雅正・亀島雅史・山本由徳・宮崎彰 2010b. 高温登熟条件下で発生する水稲品種の白未熟粒割合と基肥窒素施肥量との関係. 日作期 79:142-149.

Tan, Y. F., Xing, Y. Z., Li, J. X., Yu, S. B., Xu, C. G. and Zhang, Q. 2000. Genetic bases of appearance quality of rice grains in Shanyou 63, an elite rice hybrid. *Theor. Appl. Genet.* 101:823-829.

田中浩平・真鍋尚義 1989. 福岡県における昭和 63 年水稲の移植時期, 気象要素と生育・収量・品質. 日作九支報 56：35-38.

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.

Tashiro, T. and Wardlaw, I.F. 1991. The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice. *Aust. J. Agri. Res.* 42: 485-496.

Tatsumi, J., Endo, N. and Kono, Y. 1992. Root growth and partitioning of ^{13}C-labelled photosynthate in the seminal root of corn seedlings as affected by light intensity. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 271-278.

寺尾富夫・千葉雅大・廣瀬竜郎・松村 修 2004. 高温条件下の玄米品質に関与する遺伝子座と環境要因との相互作用. 日作紀 73(別 1)：96-97.

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 年の夏期高温が水稲の登熟と米品質に及ぼした影響. 日作紀 70：449-458.

Toojinda, T., Tragoonrung, S., Vanavichit, A., Siangliw, J. L., Pa I. N., Jantaboon, J., Siangliw. M. and Fukai, S. 2005. Molecular breeding for rainfed lowland rice in the Mekong region. *Plant Prod. Sci.* 8: 330-333.

坪根正雄・尾形武文・和田卓也 2008. 登熟期間中の温水処理による高温登

熟性に優れる水稲品種の選抜方法. 日作九支報 74：21-23.

Tsukaguchi, T. and Iida, Y. 2008. Effects of assimilate supply and high temperature during grain-filling period on the occurrence of various types of chalky kernels in rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod. Sci.* 11:203-210.

月森弘 2009. 早植コシヒカリの登熟期の葉色と品質の関係. 日作紀 78(別1)：24-25.

Umemoto, T., Nakamura, Y. and Ishikura, N. 1994. Effect of grain location on the panicle on activities involved in starch synthesis in rice endosperm. *Phytochemistry* 36:843–847.

Vong, N. Q. and Murata, Y. 1977. Studies on the physiological characteristics of C3 and C4 crop species: I. The effects of air temperature on the apparent photosynthesis, dark respiration, and nutrient absorption of some crops. *Jpn. J. Crop Sci.* 46: 45-52.

和田卓也・大里久美・浜地勇次 2002. 暖地における 1999 年の登熟期間中の高温寡照条件が米の食味と理化学的特性に及ぼした影響. 日作紀 71：349-354.

若松謙一・佐々木修・上薗一郎・田中明男 2007. 暖地水稲の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響. 日作紀 76：71-78.

若松謙一・佐々木修・上薗一郎・田中明男 2008. 水稲登熟期の高温条件下における背白米の発生に及ぼす窒素施肥量の影響. 日作紀 77：424-433.

若松謙一・佐々木修・田中明男 2009. 暖地水稲における高温登熟条件下の日射量および湿度が玄米品質に及ぼす影響. 日作紀 78：476-482.

Wan, X. Y., Wan, J. M., Weng, J. F., Jiang, L., Bi, J. C., Wang, C. M. and Zhai, H. Q. 2005. Stability of QTLs for rice grain dimension and endosperm chalkiness characteristics across eight environments. *Theor. Appl. Genet.* 110:1334-1346.

Wang, F., Chen, S., Cheng, F., Liu, Y. and Zhang, G.. 2007. The differences in grain weight and quality within a rice (*Oryza sativa* L.) panicle as affected by panicle type and source-sink relation. *J. Agr. Crop Sci.* 193: 63-73.

Won, J. G., Choi, C. D. and Lee, S. C. 1999. Interaction between N application and water management in dry-seeded rice. *Plant Prod. Sci.* 2:109-114.

藪押睦幸・角朋彦・川口満・和田博史・森田敏 2010. 宮崎県における 2007 年産早期水稲「コシヒカリ」の品質低下の要因. 日作紀 79(別 2):144-145.

Yamada, N., Murata, Y., Osada, A. and Iyama, J. 1955. Photosynthesis of Rice Plant. *Proc. Crop Sci. Soc. Jpn.* 23:214-222.

山口琢也・小島洋一郎・蛯谷武志・金田宏・木谷吉則・土肥正幸・石橋岳彦・向野尚幸・表野元保・宝田研・山本良孝 2006. 高温登熟性に優れた水稲早生新品種「てんたかく」の育成. 富山県農技セ研報 23:29-43.

Yamakawa, H., Hirose, T., Kuroda, M. and Yamaguchi, T. 2007. Comprehensive expression profiling of rice grain ripening-related genes under high temperature using DNA microarray. *Pant Physiol.* 144: 258–277.

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.

山本 良孝 , 田守 健夫 , 羽根 正憲 1985. 水稲の栽培条件と腹白米発生との関係 : 第 1 報穂肥, 実肥が腹白米発生に及ぼす影響. 北陸作物会

報 20：25-26.

Yang, L., Wang, Y., Dong, G., Gu, H., Huang, J., Zhu, J., Yang, H., Liu, G. and Han, Y. 2007. The impact of free-air CO_2 enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice. *Field Crops Res.* 102: 128-140.

安庭誠・江畑正之. 1979. 西南暖地における早期水稲の米質に関する研究: 第 4 報 背白米の特性と発現の穂上位置について. 日作九支報 45:31-33.

Yoshioka, Y., Iwata, H., Tabata, M., Ninomiya, S. and Ohsawa, R. 2007. Chalkiness in rice: Potential for evaluation with image analysis. *Crop Sci.* 47:2113-2120.

Zakaria, S., Matsuda, T., Tajima, S. and Nitta, Y. 2002. Effect of high temperature at ripening stage on the reserve accumulation in seed in some rice cultivars. *Plant Prod. Sci.* 5 :160–168.

Zhang. W. H. and Kokubun, M. 2004. Historical changes in grain yield and photosynthetic rate of rice cultivars released in the 20th century in Tohoku region. *Plant Prod. Sci.* 7:36-44.

謝辞

本研究の遂行及び取りまとめに際しては, 名古屋大学大学院生命農学科教授・山内章博士に懇切な御指導と御鞭撻を賜った. ここに記して厚く御礼を申し上げる.

愛知県農林水産部農業経営課主幹・濱田千裕博士には, 本研究の取りまとめに当たり多くの御助言と激励を賜った. 記して厚く御礼を申し上げる.

愛知県農業総合試験場長・伊藤清一氏, 前愛知県農業総合試験場長・加藤保氏, 愛知県農業総合試験場作物研究部長・工藤悟氏, 前愛知県農業総合試験場作物研究部長・大矢俊夫氏, 愛知県農業総合試験場作物研究部作物グループ総括研究員・加藤裕二氏, 前愛知県農業総合試験場作物研究部作物グループ総括研究員・加藤博美博士には, 本研究の実施に当たり多大なる御支援, 御協力と御助言をいただいた. 愛知県農業総合試験場作物研究部作物グループ谷俊男氏, 同・杉浦和彦氏, 同・遠藤征馬氏, 同・野々山利博氏, 同主任・田中雄一氏, 同・東野敦氏, 同・吉田政治氏, 同水田利用グループ技師・本庄弘樹氏, 同企画普及部企画調整グループ主任研究員・小出直哉氏, 同環境基盤研究部環境安全グループ主任研究員・久野智香子氏, 愛知県尾張農林水産事務所農業改良普及課一宮支所技師・野村有美氏, 同海部農林水産事務所主任専門員・小出俊則氏, 同西三河農林水産事務所農業改良事務所専門員・平岩確氏, 同豊田加茂農林水産事務所農業改良普及課専門員・井上勝弘氏には, 本実験の実施において多大なる御助言と御協力を賜った. 愛知県農業総合試験場環境基盤研究部環境安全グループ・武井真理氏, 同山間農業研究所稲作グループ総括研究員・中島泰則博士, 同主任研究員・水上優子博士には多くの御助言と激励を賜った. 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構作物研究所稲収量性研究チーム長・近藤始彦博士, 同主任研究官・石丸

務博士, 同研究官・荒井（三王）裕見子博士, 同米品質研究チーム主任研究官・梅本貴之博士には, 本実験の実施において多大なる御協力と御支援を賜った. 記して深甚なる謝意を表するものである.

最後に, 本研究に没頭できる環境を与えてくれた妻・敬子, 長女・花梨, 次女・柚紀, 母・千代子, 農学を志す動機を与えてくれた亡父・一彦に心より感謝する.

報文目録

1) Motoki Hayashi, Kazuhiko Sugiura, Chikako Kuno, Ikuma Endo, Yuichi Tanaka and Akira Yamauchi.
Rice Chalky Grain Reduction with Deep and Permanent Irrigation Method; Effect on Growth and Grain Quality of rice.
Plant Production Science.(In press)

2) Motoki Hayashi, Tomohiro Hayashi, Chikako Kuno, Atsushi Higashino and Akira Yamauchi.
Enhanced Nitrogen Uptake and Photosynthesis of Rice Plants Grown with Deep and Permanent Irrigation Method: Possible Mechanism for Chalky Grain Reduction.
Plant Production Science. (Submitted)

3) Motoki Hayashi, Motohiko Kondo, Tsutomu Ishimaru and Akira Yamauchi.
Effect of High Temperature on Carbon Translocation in Ripening Period of Rice.
(In preparation)