

「あいちのかおりSBL」の早生化準同質遺伝子系統の開発とその農業形質

井手康人¹⁾・堀 清純²⁾・伊藤 晃³⁾・杉浦和彦¹⁾・濱頭 葵¹⁾・山内歌子²⁾・水林達美²⁾・
安藤 露²⁾・正村純彦²⁾・加藤 満¹⁾・池田彰弘¹⁾

摘要：中食用の水稻早生品種を開発するため、業務用として需要が高い水稻中生品種「あいちのかおりSBL」について、出穂期を約10日前進させた早生の準同質遺伝子系統の作出を目指した。早生系統「あ系873」に「あいちのかおりSBL」を連続戻し交配し、出穂期遺伝子*Hd1*と*Hd17*を「あ系873」型アリルに改変した系統を作出した。この系統の出穂期について2014年から2015年に調査した結果、両年共に出穂期は目標の早生熟期となっていた。また、農業形質を2016年と2017年に調査した結果、出穂期は8.9～11.0日前進しており、2014年、2015年と同様に目標の早生熟期相当であった。しかし、「あいちのかおりSBL」に比較し稈長はやや短く、千粒重はわずかに小さくなった。また、精玄米重及び穂数は、2016年では「あいちのかおりSBL」以上となったが、2017年には同品種に及ばなかった。2016年には早生化に伴い登熟期の気温が高くなったため、玄米品質が大きく低下していた。よって、この「あいちのかおりSBL」早生化準同質遺伝子系統の生産現場への普及を図るためには、高温耐性を新たに付与することが必要と考えられた。

キーワード：あいちのかおりSBL、早生化、準同質遺伝子系統

緒 言

中生品種「あいちのかおりSBL」の本県における作付面積は、水稻作付全体の約40%を占める(愛知県園芸農産課2017年調べ)。一方で、早生品種である「あさひの夢」及び「ゆめまつり」は、近年、夏季が高温に経過する傾向にあるため品質が低下しやすく、消費者の評価も安定しないことから、2品種を併せても作付面積は約4%と極めて少ない。

また、米の需要が年々減少する中で、外食産業で用いられる業務用米や、市販の弁当やおにぎり等に使用される中食用米は堅調な需要が期待されている。県産の業務用米のうち、「あいちのかおりSBL」は約7割を占めており、今後も更なる需要拡大が見込まれている¹⁾。

生産現場では、実需要望の高い「あいちのかおりSBL」の作付集中による作業競合が生じていることから、「あいちのかおりSBL」の現在以上の作付拡大は困難である。本品種の出穂期を約10日前進させることを目

標に、早生熟期の準同質遺伝子系統(以下、NIL)を作出することができれば、作期分散により、中食用好適米の増産が可能となる。

イネにおいては出穂期を制御する数々の出穂期遺伝子アリルとその効果が調査されており²⁾、*Hd1*の改変により「コシヒカリ」や「ミルキークイーン」の出穂期を約10日前進した報告がある^{3,4)}。しかし、「あいちのかおりSBL」の遺伝背景においては、出穂期遺伝子の改変効果を調査した事例は無く、どの遺伝子アリルを導入すれば早生熟期のNILが得られるのかは不明である。

そこで本研究では、早生熟期の品種及び系統に「あいちのかおりSBL」を戻し交配し、異なる出穂期遺伝子を導入した複数のNILを作出し、出穂期を確認した。また、目標の早生熟期となった系統についてNILの育成を進め、その農業形質の一部を調査したので報告する。

なお、NIL育成を迅速に行うため、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構次世代作物開発研究センター(以下、次世代作物開発研究センター)のゲノム育種支援事業を活用した。

本研究の一部は日本育種学会平成29年度春季大会(2017年3月)、農研機構次世代作物開発研究センター主催シンポジウム「競争力の高い水稻品種開発に向けたDNAマーカー技術の活用と連携」(2017年6月)において発表した。

本研究は次世代ゲノム基盤プロジェクト「イネのDNAマーカー育種の利用推進(RBS1003)」により実施した。

¹⁾作物研究部 ²⁾国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構次世代作物開発研究センター ³⁾作物研究部(現農業経営課)

(2018.9.5受理)

材料及び方法

1 実施場所

交配、選抜及び生産力検定を始めとした栽培試験は、農業総合試験場作物研究部において実施した。

交配個体の選抜に関するDNAマーカー検定、出穂期遺伝子のアレル解析等の遺伝子解析試験は、次世代作物開発研究センターが実施した。

2 出穂期遺伝子導入親

「あいちのかおりSBL」を早生化させるための出穂期遺伝子導入親として、本県育成の早生系統「あ系873」及び「あ系883」（組合せは共にあいちのかおりSBL/愛知112号）の2系統と、愛知県では極早生品種である「コシヒカリ」1品種を用いた。

なお、各導入親が保有する出穂期遺伝子のアレル構成について事前調査したところ、*Hd1*、*Hd16*、*Hd17*及び*Hd18*の四つの遺伝子が「あいちのかおりSBL」に比較し異なっていた(表1)。

3 NILの育成手法及び育成経過

(1) 育成手法

「あいちのかおりSBL」の出穂期を約10日前進化させ、目標の早生熟期となる出穂期遺伝子の組み合わせを明らかにするため、出穂期遺伝子導入親に「あいちのかおりSBL」を複数回交配し、出穂期遺伝子の組み合わせが異なる8系統を作出した。

目的の早生熟期NILを作出するため、出穂期遺伝子のDNAマーカー検定と、延べ403マーカーによる周辺領域のSNPジェノタイピングにより、戻し交配後代の中から導入する出穂期遺伝子だけが遺伝子導入親型で、それ以外のゲノム領域が「あいちのかおりSBL」型に置換した個体を選抜した。さらに、早生熟期となった系統については、導入した出穂期遺伝子の近傍領域が「あいちのかおりSBL」型に組換わった個体をDNAマーカー検定により選抜し、自殖させることで早生化NILを作出した。

(2) 出穂期遺伝子の改変効果調査

2014年から2015年に、異なる出穂期遺伝子アレルを持

表1 供試品種・系統の出穂期遺伝子のアレル型調査結果

品種・系統名	出穂期遺伝子のアレル型			
	<i>Hd1</i>	<i>Hd16</i>	<i>Hd17</i>	<i>Hd18</i>
あ系873	中間型	晩生型	早生型	晩生型
あ系883	中間型	晩生型	早生型	早生型
コシヒカリ	中間型	早生型	晩生型	早生型
あいちのかおりSBL	晩生型	晩生型	晩生型	晩生型

注) 農研機構次世代作物開発研究センター調査結果。他の出穂期遺伝子(*Hd6*, *Ghd7*, *Hd5*, *Ehd1*)は、4品種・系統とも全て同一アレルで固定。

つ八つのNILの育成過程において、遺伝子型調査により出穂期遺伝子がホモ型で固定されていた個体の出穂期を調査し、「あいちのかおりSBL」に比較し出穂期がどの程度改変されていたのかを調査した。2014年はBC₁F₂及びBC₂F₂世代、2015年はBC₃F₂世代をそれぞれ用いた。

4 早生化NILの農業形質評価

早生化NILについて、2016年に「育2335」、2017年に「育2335」及び「育2337」の生産力検定を実施し、農業形質を調査した。生産力検定については、中苗機械植えで実施した。移植期は兩年とも5月下旬であり、愛知県における早植栽培相当とした(耕種概要は表4に記載)。

5 早生化NILの次世代シーケンサによる遺伝子解析

次世代シーケンサ(株式会社イルミナ、MiSeq、アメリカ合衆国)を用い、育成した早生化NIL「育2335」について、導入された出穂期遺伝子以外のゲノム領域が「あいちのかおりSBL」とどの程度の同質性であるかを確認した。

結果及び考察

1 出穂期遺伝子の改変効果

「あいちのかおりSBL」に異なる出穂期遺伝子を導入した八つのNILについて出穂期を調査した結果、「あ系873」、「あ系883」に由来する*Hd1*及び*Hd17*を持つ系統が、「あいちのかおりSBL」に比較し8.9~11.0日早生となり、2014年、2015年ともに目標の早生熟期となっていた(表2)。また、2015年は2014年に比較し6月から7月下旬にかけての気温が低く推移していたが(データ省略)、年次間の出穂期改変効果に大きな差が無いことから、*Hd1*と*Hd17*が共存する場合の効果は年次変動が少なく、「あいちのかおりSBL」を早生化するために有用であると考えられた。

一方、*Hd1*単独の導入系統では出穂期改変効果は最大で2.4日早生であり、*Hd17*単独の導入系統では6.2~7.5日早生となり、それぞれの遺伝子単独での改変効果は小さかった。

「コシヒカリ」由来の*Hd16*の導入系統については、出穂期改変効果が2014年で20.0日、2015年で16.5日と、出穂期の前進効果は目標以上に大きくなった。

「コシヒカリ」由来の*Hd18*の導入系統は、2014年では1.6日であったのに比較し、2015年では4.5日であり、約3日改変効果が大きくなっていた。

「コシヒカリ」または「あ系883」由来の*Hd1*と*Hd18*を持つ系統については、2014年の改変効果はいずれも8.9日であったのに比較し、2015年は3.3、4.3日と約5日改変効果が小さくなっていた。

「あ系883」由来の*Hd17*と*Hd18*を持つ系統についても、出穂期改変効果は年次により3.5日異なっていた。

2015年の*Hd18*単独系統については、「コシヒカリ」由来の系統は4.5日早生であったが、「あ系883」由来の系統は1.6日早生であり、遺伝子導入親の違いにより約3

日の差が生じていた。

以上のことから、*Hd18*を導入した場合の効果は年次により異なり、*Hd1*や*Hd17*と比較して安定的ではないと考えられた。

また、「コシヒカリ」と「あ系883」の*Hd18*は共に早生型アレルであるため、2014、2015年の選抜系統では、*Hd18*以外の出穂期に影響する染色体領域が残存していた可能性が考えられた。

2 育成経過

NILの育成に向けた交配は、2012年より開始し、育成は2017年に完了した(表3)。

以下において、作出した八つのNILのうち、目標の早生熟期となり、その後の育成を進めた「あ系873」由来の*Hd1*及び*Hd17*を持つNILの育成経過を記載する。

(1) $F_1 \sim BC_1F_1$ 世代

2012年の冬期に「あいちのかおりSBL」と出穂期遺伝子導入親を交配し、 F_1 個体を作成した。2013年の夏期に F_1 個体を父本、「あいちのかおりSBL」を母本とした戻し交配を実施し、 BC_1F_1 世代種子を得た。うち、「あ系873」の BC_1F_1 世代400個体を2013年の秋期に展開し、遺伝子型調査により導入した出穂期遺伝子の近傍で組換えが生じ

表2 「あいちのかおりSBL」に導入した出穂期遺伝子アレルの出穂期改変効果(前進日数)

導入した 出穂期遺伝子の 組み合わせ	出穂期遺伝子導入親					
	「コシヒカリ」		「あ系873」		「あ系883」	
	2014年	2015年	2014年	2015年	2014年	2015年
① <i>Hd1</i>	2.4	1.1	1.5	1.0	0.1	1.8
② <i>Hd16</i>	20.0	16.5	-	-	-	-
③ <i>Hd17</i>	-	-	7.5	6.5	-	6.2
④ <i>Hd18</i>	1.6	4.5	-	-	1.1	1.6
⑤ <i>Hd1+Hd17</i>	-	-	9.9	11.0	8.9	9.9
⑥ <i>Hd1+Hd18</i>	8.9	4.3	-	-	8.9	3.3
⑦ <i>Hd17+Hd18</i>	-	-	-	-	5.9	9.4
⑧ <i>Hd1+Hd17+Hd18</i>	-	-	-	-	8.9	11.7

注) 単位: 日。導入した出穂期遺伝子アレルがホモ接合体型の個体のみを調査。「あいちのかおりSBL」出穂期について、2014年:8月20日、2015年:8月24日。2014年は BC_2F_2 世代、2015年は BC_3F_2 世代について調査。

表3 「あいちのかおりSBL」早生純同質遺伝子系統「育2335」及び「育2337」の育成経過

出穂期 遺伝子供試親	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年			
あ系873	世代 作業	F1 交配	BC_1F_1 戻し交配	BC_2F_1 戻し交配	BC_3F_1 戻し交配	BC_3F_2 自殖	BC_3F_3 自殖	BC_3F_4 自殖	BC_3F_5
	系統数					1	2	2	
	個体数	13	400	146	363	645	49	960	
	DNAマーカー選抜個体数		15	10	7	3	3	3	
あ系883	世代 作業		F1 交配	BC_1F_1 戻し交配	BC_2F_1 戻し交配	BC_3F_1 戻し交配			
	個体数		400	40	510	108			
	DNAマーカー選抜個体数		18	18	9	39			
	世代 作業	F1 交配	BC_1F_1 戻し交配	BC_2F_1 戻し交配	BC_3F_1 戻し交配	BC_4F_1 戻し交配			
コシヒカリ	個体数	65	400	179	640	62			
	DNAマーカー選抜個体数		20	13	6	31			

ていた15個体を選抜した。

(2) $BC_1F_1 \sim BC_3F_1$ 世代

選抜した BC_1F_1 世代15個体について、2013年の冬季に戻し交配を実施し、 BC_2F_1 世代146個体を得た。これらについて遺伝子型調査を実施し、出穂期遺伝子近傍が大きく「あいちのかおりSBL」型に置き換わった10個体を選抜した。2014年の夏期に戻し交配を行い、 BC_3F_1 世代の計363個体を得た。

(3) $BC_3F_1 \sim BC_3F_5$ 世代

BC_3F_1 世代以降は、遺伝子型調査によりゲノム背景がより「あいちのかおりSBL」型に置き換わった個体を選抜しつつ、自殖を繰り返した。2016年の BC_3F_3 世代において「育2335」の系統番号を付名した。また、「育2335」より派生した BC_3F_4 世代の系統について、新たに「育2337」の系統番号を付名した。

3 育成した早生純NILの遺伝子解析

次世代シーケンサによる解析の結果、「育2335」の第6染色体上の*Hd1*及び*Hd17*は「あ系873」型であり、導入断片の長さは*Hd1*周辺が約1.2 Mbp、*Hd17*周辺が約1.1 Mbpであった(データ省略)。他の領域については、99%以上が「あいちのかおりSBL」のゲノムに置換されていた。しかし、わずかながら出穂期遺伝子以外の領域にも「あ系873」に由来する染色体断片が残存していたため、それらが農業形質に与える影響の有無を確認する必要があると考えられた。

4 生産力検定における農業形質評価

2016年と2017年の生産力検定について、早生純NILである「育2335」及び「育2337」の出穂期は、両年ともに「あさひの夢」相当であり、2014年と2015年に実施した出穂期調査と同様に早生熟期となっていた(表4)。

早生純NILの稈長は、「あいちのかおりSBL」に比較し2016年では4 cm、2017年では2~3 cm短稈化していた。出穂期遺伝子は出穂期以外の様々な形態形質に多面的な効果があることが明らかになってきており、稈長については、*Hd1*を改変して早生化することで開発された品種「コシヒカリ関東HD1号」や「ミルキーサマー」が、元の品種に比較し短稈化した報告がある^{3,4)}。また、*Hd17*の改変による早生も短稈化に影響している可能性がある

表4 「あいちのかおりSBL」早生化純同質遺伝子系統「育2335」及び「育2337」の生産力検定結果

年次	品種・系統名	出穂期 月.日	成熟期 月.日	熟期 区分	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本/m ²	精玄米重 kg/a	千粒重 g	整粒歩合 %	玄米 外観品質
2016	育2335	8.09	9.16	早生	71	20.5	376	70.1	24.9	31.7	6.5
	ゆめまつり	8.12	9.20	早生	67	21.1	318	59.8	23.1	35.7	6.5
	あさひの夢	8.10	9.14	早生	63	21.0	342	60.7	23.0	28.5	6.8
	あいちのかおりSBL	8.17	9.27	中生	75	20.0	366	56.3	25.2	69.8	4.8
2017	育2335	8.08	9.18	早生	78	20.1	347	57.8	24.5	75.2	4.5
	育2337	8.10	9.18	早生	77	20.0	380	54.1	24.0	71.6	4.5
	ゆめまつり	8.14	9.21	早生	74	21.0	422	53.3	23.1	77.9	4.8
	あさひの夢	8.10	9.17	早生	72	20.0	411	63.8	23.0	70.9	4.8
	あいちのかおりSBL	8.18	10.01	中生	80	20.5	458	60.3	24.7	75.1	4.8

1) 玄米外観品質は1(上の上)~9(下の下)の9段階評価 5: 検査等級1等相当、6: 2等相当、7: 3等相当。

2) 移植日 2016年:5月24日、2017年:5月25日。施肥量:(Nkg/a)基肥 - 穂肥 I - 穂肥 II = 0.56 - 0.26 - 0.26

る。従って、本育成系統の短稈化については、「あ系873」に由来する*Hd1*または*Hd17*の多面的発現により生じた可能性がある。

穂数は、2016年では「あいちのかおりSBL」と「育2335」はほぼ同等であったが、2017年はm²あたり「育2335」で111本、「育2337」で78本減少していた。

さらに、精玄米重は、2016年には「あいちのかおりSBL」に比較し多収であったが、2017年は「育2335」と「育2337」はともに少収となった。

千粒重については、早生化NILと同等の早生熟期である「ゆめまつり」や「あさひの夢」と比較した場合、2016年は1.8~1.9 g、2017年は0.9~1.5 g大きかった。一方で、「あいちのかおりSBL」と比較した場合、2016年は0.3 g小さく、2017年では「育2335」は0.2 g、「育2337」は0.7 gそれぞれ小さかった。

整粒歩合については、2016年の早生化NIL及び早生品種は約30%と低かった。また、玄米外観品質についても6.5~6.8と2等相当であった。一方で、2017年は全ての供試品種、系統で整粒歩合は70%以上であり、外観品質も1等相当であった。水稻は、登熟期間の高温により白未熟粒の発生が増加することが報告されている⁵⁾。8月第4、第5半旬の平均気温について、2017年は26.8℃とほぼ平年並みであったが、2016年は28.3℃と高温で推移した(データ省略)。その結果、早生化NILや早生品種の外観品質が低下したと考えられた。

以上の結果から、開発した「あいちのかおりSBL」の早生化NILは、遺伝的には「あいちのかおりSBL」とほぼ同質であったが、出穂期以外の農業形質に複数の変化が認められた。穂数や精玄米重のような農業形質として重要な項目についても試験年次により異なる傾向を示したため、本育成系統の特性把握のために、栽培年次を更に重ねて試験を実施する必要があると考えられた。

これらの変化が導入した出穂遺伝子の多面的発現によるものか、栄養成長の期間や登熟条件が変わった結果生じたものなのか、または出穂期遺伝子以外の領域に残存した「あ系873」由来の染色体断片によるものなのか

は、今後も調査を実施し明らかにしていく必要がある。

今後、NILを中食用の早生品種の開発に活用するため、業務用加工適性を始めとした他の形質についても、「あいちのかおりSBL」との比較調査を継続している。

また、早生化NILについては、出穂が早まることにより登熟期間が「あいちのかおりSBL」に比較し高温となるため、2016年の試験結果と同様に、玄米外観が低下しやすいと考えられる。よって、生産現場に普及を図れる中食用の実用早生品種を開発するためには、早生化NILに、「TS-3」等の高温耐性系統を遺伝子供与親とし、高温耐性を付与していく必要があると考えられた。

引用文献

1. 農林水産省. 米に関するマンスリーレポート(平成29年2月号). (2017). <http://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/soukatu/attach/pdf/mr-19.pdf>. (2018. 5. 20参照)
2. Hori K., Matsubara K., Yano M. Genetic control of flowering time in rice: integration of Mendelian genetics and genomics. *Theor. Appl. Genet.* 129, 2241-2252(2016)
3. 竹内善信, 加藤浩, 根本博, 太田久稔, 佐藤宏之, 山正賢, 平林秀介, 出田収, 青木法明, 坂井真, 蛭谷武志, 田口文緒, 山本敏央, 矢野昌裕, 井辺時雄, 安東郁男. コシヒカリと同質の遺伝的背景を持つ極早生の水稻品種「コシヒカリ関東HD1号」の育成. *作物研報.* 9, 1-25(2008)
4. 竹内善信, 安東郁男, 根本博. ミルキークイーンの出穂性を改変した水稻品種「ミルキーサマー」の育成(特集 作物育種におけるDNAマーカーの開発と利用). *作物研報.* 14, 77-95(2013)
5. 船生岳人, 加藤恭宏, 中村充. 高温登熟条件下で栽培した水稻品種における玄米品質低下程度の比較. *育種学研究.* 8(別1). 179(2006)