

水稲品種「コシヒカリ」を遺伝背景とする野生稲の染色体断片置換系統群を用いた高温登熟耐性に関する染色体領域の探索

濱頭 葵¹⁾・高師知紀²⁾・芦刈基行³⁾・北野英己⁴⁾・伊藤 晃⁵⁾・杉浦和彦⁶⁾・井手康人⁷⁾
・中村 充⁵⁾・津田健吾⁵⁾・加藤 満⁸⁾

摘要: 野生稲 *Oryza nivara* 及び *O. rufipogon* を一回親、栽培稲「コシヒカリ」を反復親として戻し交配することで作成した染色体断片置換系統群(Chromosome Segment Substitution Lines: CSSLs)を高温条件下で栽培し、白未熟粒(背白粒及び基部未熟粒)の発生に関する野生稲由来の染色体領域を探索した。供試した置換系統のうち、「コシヒカリ」の第10染色体の一部が *O. nivara* 型に置換した系統、第3染色体及び第7染色体の一部がそれぞれ *O. rufipogon* 型に置換した系統は、「コシヒカリ」より白未熟粒の発生が抑制された。このことから、これらの置換領域内に高温条件下での白未熟粒発生を抑制する高温登熟耐性に関する領域が存在する可能性が示唆された。

キーワード: 野生稲、*Oryza nivara*、*Oryza rufipogon*、染色体断片置換系統、高温登熟耐性

Detection of Chromosomic Regions Related to High Temperature Tolerance Using Chromosome Segment Substitution Lines (CSSLs) Derived from *Oryza nivara* and *O. rufipogon* in the Genetic Background of the Japonica Rice Cultivar 'Koshihikari' (*Oryza sativa* L.)

HAMAGASHIRA Aoi, TAKASHI Tomonori, ASHIKARI Motoyuki, KITANO Hidemi,
ITO Akira, SUGIURA Kazuhiko, IDE Yasuto, NAKAMURA Mitsuru, TSUDA Kengo
and KATO Mitsuru

Abstract: In this study, we explored the chromosomal regions related to white-back grain and basal white-grain by cultivating chromosome segment substitution lines (CSSLs) under high temperature conditions. The CSSLs used in this study were derived from wild rice, *Oryza nivara*, and *O. rufipogon* in the genetic background of the japonica rice cultivar 'Koshihikari' (*Oryza sativa* L.). The appearance quality of brown rice of CSSLs carrying a chromosome segment from *O. nivara* on chromosome 10, and from *O. rufipogon* on chromosome 3 and chromosome 7 were superior to 'Koshihikari', indicated that those chromosome regions related to high temperature tolerance.

Key Words: Wild rice, *Oryza nivara*, *Oryza rufipogon*, Chromosome segment substitution lines (CSSLs), High temperature tolerance

本研究の一部は日本育種学会第131回講演会において発表した。また、本研究は共同研究「「コシヒカリ」を遺伝背景とする野生稲の染色体断片置換系統群を用いた高温登熟性に関する染色体領域の探索」により実施した。
¹⁾作物研究部(現海部農林水産事務所) ²⁾株式会社ステイグリーン ³⁾名古屋大学生物機能開発利用研究センター ⁴⁾名古屋大学生物機能開発利用研究センター(退職) ⁵⁾作物研究部 ⁶⁾作物研究部(現研究戦略部) ⁷⁾作物研究部(現西三河農林水産事務所) ⁸⁾作物研究部(退職)

(2021.9.8受理)

緒言

近年、水稲の登熟期間の気温が高く推移することにより基部未熟粒、背白粒、乳白粒等の白未熟粒が多発している。愛知県では、「コシヒカリ」は1年のうち最も気温が高い7月下旬から8月上旬に出穂するため、白未熟粒の多発により玄米の外観品質が低下しやすい。愛知県産「コシヒカリ」の一等米比率は、2016年から2020年の平均で15.4%と低い状況にある¹⁾。白未熟粒による一等米比率の低下は農家の所得減少の要因となっている。

登熟期の高温による白未熟粒の発生は遺伝的に制御されることが示されている^{2,3)}。近年、「コシヒカリ」とインド型品種「ハバタキ」の交配後代から白未熟粒発生の抑制に関与する遺伝子 *Apq1* が同定され⁴⁾、*Apq1* 座に存在する3つの遺伝子のうちの1つである *Sus3* が登熟期間中に発現量が増加することが報告された⁵⁾。また、「ハナエチゼン」と「新潟早生」の交配後代から玄米の背白粒発生率に関与する4つのQTLが検出されている⁶⁾。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書(2013)によると今後も温暖化傾向は続く予測されており⁷⁾、白未熟粒の発生を抑制する遺伝資源の探索とその育種的利用がさらに必要になると考えられる。

野生稲は栽培稲と比較して遺伝的多様性を保持していることから育種利用が可能な有用形質の探索に利用されており、これまでにも、栽培稲と野生稲の染色体断片置換系統群(Chromosome Segment Substitution Lines: 以下CSSLs)を利用した収量性や病害虫抵抗性に関する評価から、有用形質導入の遺伝資源としての野生稲の有用性が示されている⁸⁻¹¹⁾。しかし、白未熟粒の発生に関与する遺伝領域についての報告は少ない¹²⁾。

本稿では、野生稲 *O. nivara* 及び *O. rufipogon* を一回親、「コシヒカリ」を反復親とする戻し交配により作出したCSSLsを高温条件下で栽培することにより、白未熟粒発生の抑制すなわち高温登熟耐性に関与する野生稲由来の染色

体領域の探索を試みた。

材料及び方法

1 CSSLsの育成及び白未熟粒発生率の評価

(1) 「コシヒカリ」と *O. nivara* を用いたCSSLsの作成

Furuta *et al.* (2016)が育成したコシヒカリ/*O. nivara* のCSSLs(NSLs)26系統¹⁰⁾のうち、一部の系統(NSL-1、5、7、9、10、12、13、17、18、20、22、23、25、26)に「コシヒカリ」を交配した後自殖し、*O. nivara*の置換領域をさらに細分化した集団を作出した。この集団から、AcycloPrime-FP Detection System and Fluorescence Polarization Analyzer (PerkinElmer社、神奈川)を用いて系統群全体で野生稲の染色体領域をすべてカバーできる33系統を選抜した(図1)。これらのCSSLsを「NLs」として供試した。

(2) 「コシヒカリ」と *O. rufipogon* を用いたCSSLsの作成

NLsと同様に、Furuta *et al.*(2014)が育成したコシヒカリ/*O. rufipogon* CSSLs 33系統⁹⁾をもとに、*O. rufipogon* の染色体置換領域を更に固定または細分化した集団(37系統、図2)を作出し、「RLs」として供試した。

なお、NLs、RLsの作出は株式会社ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン(千葉県木更津市)が行った。

(3) NLs及びRLsの白未熟粒発生率の評価

2011年にNLsの、2012年にRLsの白未熟粒発生率を調査した。愛知県農業総合試験場内のガラス温室において、NLsは5月27日に、RLsは6月5日に株間15cm、条間30cm、1本植えて各系統40個体を移植、栽培した。施肥は肥効調節型肥料を用い、窒素施肥量で5.0g/m²とした。対照品種には「コシヒカリ」を用いた。温室は無加温で、気温30°Cで天窗と側窓が開閉するよう設定した。また、生育期間中の温室内の気温を温度記録計おんどり Jr. TR-51A(株式会社ティアンドデイ、長野)で記録し、各供試系統の出穂後20日間の日平均気温を登熟温度として算出した。成熟期に生育が

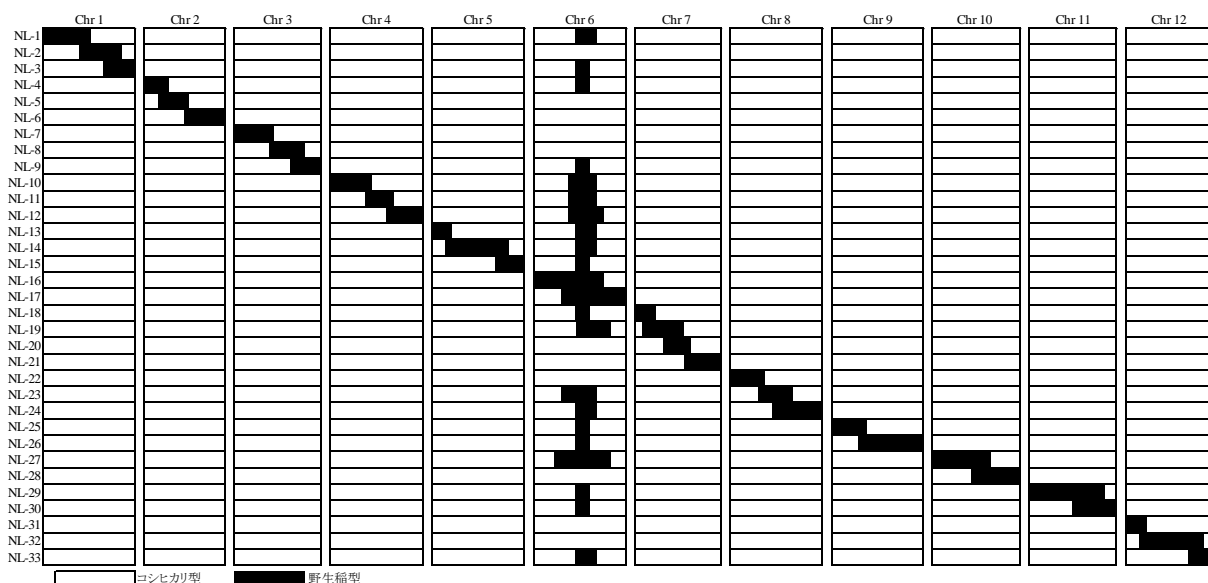


図1 NLsのグラフィカルジェノタイプ

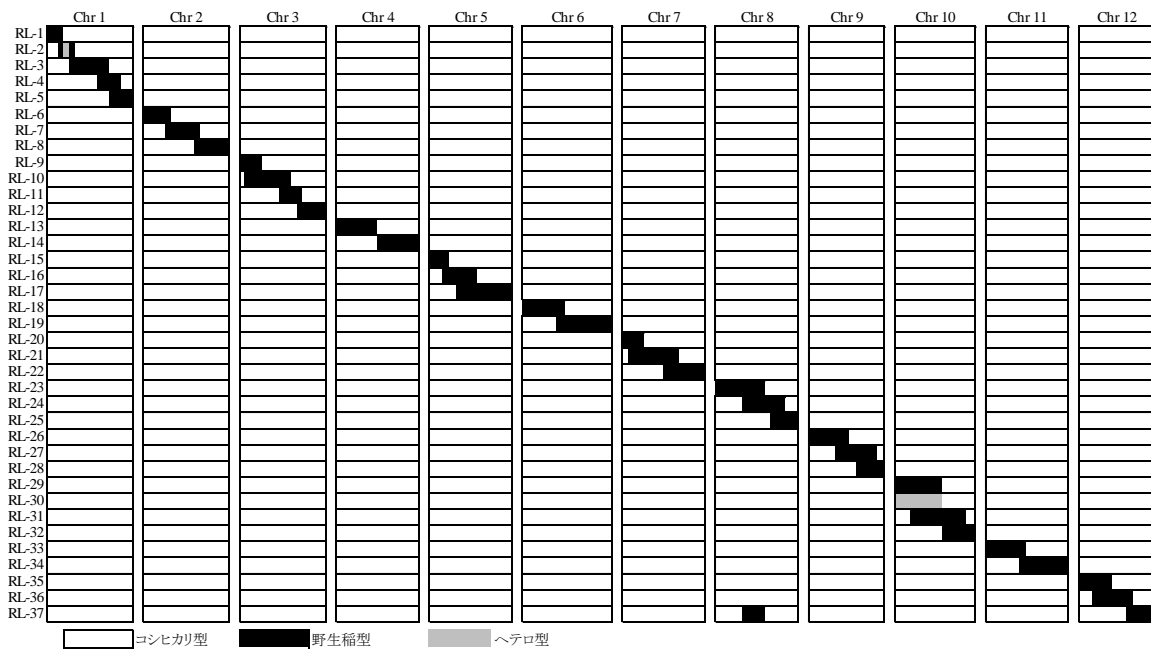


図2 RLsのグラフィカルジェノタイプ

中庸な10株を収穫し、玄米を1.8mmの篩で選別した後、穀粒判別機RGQI10(株式会社サタケ、東京)を用いて1000粒中の整粒、基部未熟粒、背白粒、乳白粒の発生率を調査した。なお、使用した穀粒判別機では背白粒と腹白粒が区別されず腹白粒と分類される。目視による判別では腹白粒の発生がなかったことから、本研究では腹白粒を背白粒として評価し、乳白粒・基部未熟粒・背白粒の合計を白未熟粒とした。また、穀粒判別機では粒長/粒幅比が大きい場合は奇形粒に分類され整粒の比率が低くなるため、目視により各分類に相当する粒比率を判定した。

2 白未熟粒発生率に関する染色体領域の絞り込み

(1) 材料の育成

NLs及びRLsで見出した白未熟粒発生率に関する野生稲染色体領域を絞り込むため、NLs及びRLsの置換染色体断片をさらに細分化した系統を以下の方法で作出した。2011年及び2012年に行った試験で白未熟粒発生率が低かったNL-28、RL-10及びRL-22を母本、コシヒカリを父本として交配した後自殖によりNLはF₃世代、RLはF₃世代を養成した。その後、1(1)で用いた方法で対象の染色体領域長の異なる個体を選抜し、系統を作出した。それぞれの系統の置換された染色体の番号から、NL-28に由来する系統群をN10s、RL-10に由来する系統群をR3s、RL-22に由来する系統群をR7sとした。

(2) 白未熟粒発生率に関する染色体領域の探索

N10s、R3s、R7sの白未熟粒発生率を評価するため、2016年から2018年及び2020年において栽培試験を実施した。対照品種は「コシヒカリ」、参考品種として愛知県が育成した高温登熟耐性品種「なつきり」を供試した。栽培及び白未熟粒発生率の評価はNLs及びRLsの評価と同様の方法で行った。移植日は、2016年は6月21日、2017年は6月22日、2018年は6月20日、2020年は6月24日であった。玄米1000粒中の

整粒比率、基部未熟粒発生率、背白粒発生率を逆正弦変換し、Dunnnettの検定により各供試系統と「コシヒカリ」と白未熟粒発生率を比較した。統計処理ソフトはRを使用した。

結果及び考察

1 CSSLs(NLs及びRLs)の育成

NLs及びRLsのグラフィカルジェノタイプ(遺伝子型)を図1及び図2に示した。それぞれの系統の野生稲由来の置換染色体断片は、系統群全体で12対の染色体領域をすべてカバーしていた。各系統のゲノム全体に対する置換染色体断片の割合は、NLsは0.6~7.8%、RLsは0.7~10.1%の範囲であった。なお、NLsは第6染色体の分離に歪みが生じていたため、NL-1、3、4、9、10、11、12、13、14、15、18、19、23、24、25、26、27、29、30、31、33については、第6染色体の染色体置換領域も*O.nivara*ホモ型で固定した。

2 NLs及びRLsの白未熟粒発生率の評価

(1) NLs

NLs 33系統及び「コシヒカリ」の評価結果を表1に示した。「コシヒカリ」の出穂期が8月1日であったのに対し、NL-9を除く32系統の出穂期は7月28日から8月13日となった。登熟温度は「コシヒカリ」が28.0°C、NLs32系統が27.2~28.0°Cであった。白未熟粒の発生は出穂後20日間の平均気温が27°Cを超えると増加するため¹³⁾、出穂が遅れ登熟温度が27°Cを下回ったNL-9は評価の対象から除外した。

整粒比率は「コシヒカリ」が2.2%であったのに対し、NLsは0~35.4%のばらつきを示した。「コシヒカリ」及びNLsの基部未熟粒発生率はそれぞれ22.1%、0.1~26.9%、背白粒発生率は8.7%、0~15.1%、乳白粒発生率は36.3%、0.4~69.7%であった。NLsのうち、第8染色体上に野生稲の置換染色体

表 1 NLs の高温登熟耐性検定結果(2011 年)

品種・ 系統名	出穂期 月. 日	±コシヒカリ 出穂期 日	登熟 温度 ℃	整粒 %	基部 未熟 粒 %	背白 粒 %	乳白 粒 %	粒長/ 粒幅
NL-1	8.05	4	27.9	0.2	7.8	1.1	52.9	1.92
NL-2	8.09	8	27.5	3.9	5.1	3.2	59.0	1.93
NL-3	8.09	8	27.5	17.3	7.5	5.3	40.0	1.95
NL-4	8.10	9	27.4	1.0	5.4	4.3	69.7	2.01
NL-5	8.04	3	27.9	1.2	10.6	9.0	54.2	1.89
NL-6	8.09	8	27.5	13.4	20.3	7.9	27.6	1.87
NL-7	8.13	12	27.2	23.6	5.9	3.6	9.8	2.11
NL-8	8.05	4	27.9	7.3	22.4	7.7	36.0	1.95
NL-9	8.27	26	26.3	11.9	29.9	11.8	11.2	1.99
NL-10	7.28	-4	27.8	4.7	7.9	11.1	46.8	1.97
NL-11	7.31	-1	28.0	3.4	10.9	4.5	34.1	2.04
NL-12	8.05	4	27.9	6.8	14.4	3.8	37.3	1.97
NL-13	8.09	8	27.5	6.8	8.1	8.6	29.9	2.07
NL-14	8.05	4	27.9	5.1	17.0	3.9	23.2	2.12
NL-15	8.08	7	27.7	19.1	13.4	8.4	26.9	1.83
NL-16	7.28	-4	27.8	0.0	3.8	0.8	19.7	1.82
NL-17	7.30	-2	28.0	1.5	19.4	2.8	48.0	1.91
NL-18	8.08	7	27.7	0.3	0.4	0.2	2.8	1.75
NL-19	8.09	8	27.5	0.0	0.1	0.0	0.4	1.60
NL-20	8.05	4	27.9	6.7	26.9	5.8	28.5	1.84
NL-21	8.05	4	27.9	21.7	18.5	5.7	29.0	1.91
NL-22	8.10	9	27.4	35.4	18.1	9.4	18.3	1.97
NL-23	7.30	-2	28.0	3.4	5.8	2.9	57.8	1.81
NL-24	8.07	6	27.7	24.8	17.4	8.7	28.2	1.88
NL-25	8.03	2	27.9	11.8	7.5	4.9	43.7	1.85
NL-26	8.08	7	27.7	18.7	16.1	15.1	31.7	1.86
NL-27	7.31	-1	28.0	0.1	2.0	0.7	59.1	2.02
NL-28	8.07	6	27.7	34.7	10.0	4.3	19.9	1.88
NL-29	8.04	3	27.9	0.8	3.2	0.4	29.1	1.96
NL-30	8.05	4	27.9	0.9	5.7	2.0	20.8	2.02
NL-31	8.07	6	27.7	10.7	13.7	7.8	31.6	1.83
NL-32	8.08	7	27.7	13.2	15.3	8.8	36.0	1.90
NL-33	8.05	4	27.9	16.8	15.0	7.0	28.9	1.93

注) 登熟温度:出穂後 20 日間の日平均気温

表 2 RLs の高温登熟耐性検定結果(2012 年)

品種・ 系統名	出穂期 月. 日	±コシヒカリ 出穂期 日	登熟 温度 ℃	整粒 %	基部 未熟 粒 %	背白 粒 %	乳白 粒 %	粒長/ 粒幅
RL-1	8.06	-2	27.2	11.9	12.3	7.7	19.3	1.80
RL-2	8.06	-2	27.2	4.7	17.6	10.9	27.3	1.87
RL-3	8.09	1	27.3	9.3	34.4	5.8	18.6	1.90
RL-4	8.11	3	27.3	6.2	30.5	5.2	23.1	1.85
RL-5	8.11	3	27.3	12.1	17.4	4.7	20.7	1.78
RL-6	8.13	5	27.3	28.7	6.3	5.4	9.7	1.93
RL-7	8.09	1	27.3	6.6	11.2	10.0	21.9	1.97
RL-8	8.12	4	27.4	23.9	13.8	5.1	10.7	1.90
RL-9	8.17	9	27.1	21.9	13.6	7.4	13.6	2.01
RL-10	8.14	6	27.2	6.4	1.1	1.6	4.9	2.23
RL-11	8.11	3	27.3	31.0	7.5	3.9	11.5	1.89
RL-12	9.10	23	24.1	13.3	1.9	5.2	23.5	1.91
RL-13	8.09	1	27.3	11.2	11.8	9.7	27.1	1.87
RL-14	8.12	4	27.4	28.1	15.9	5.2	15.1	1.91
RL-15	8.10	2	27.3	23.4	14.9	6.0	17.1	1.88
RL-16	8.08	0	27.3	17.4	7.4	2.3	6.5	2.13
RL-17	8.09	1	27.3	14.7	36.9	7.7	14.0	1.95
RL-18	9.06	28	25.0	1.6	29.8	8.4	15.9	1.84
RL-19	8.11	3	27.3	17.1	18.1	6.4	21.7	1.92
RL-20	8.09	1	27.3	28.7	13.7	3.9	13.9	1.86
RL-21	8.17	9	27.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.35
RL-22	8.14	6	27.2	44.7	6.2	2.8	9.0	1.84
RL-23	8.18	10	27.0	25.4	14.5	8.3	15.9	1.96
RL-24	8.09	1	27.3	12.8	22.0	5.7	23.3	1.87
RL-25	8.11	3	27.3	24.2	16.7	7.8	16.8	1.95
RL-26	8.12	4	27.4	40.9	14.6	3.1	10.1	1.97
RL-27	8.12	4	27.4	10.5	15.6	13.4	18.0	1.95
RL-28	8.11	3	27.3	5.7	16.6	17.2	30.5	1.90
RL-30	8.11	3	27.3	29.3	17.4	5.6	13.8	1.84
RL-31	8.12	4	27.4	20.9	11.9	5.5	19.0	1.89
RL-32	8.10	2	27.3	33.8	11.0	3.3	14.3	1.93
RL-33	8.08	0	27.3	30.4	15.2	9.9	12.1	1.88
RL-34	8.08	0	27.3	18.6	24.9	10.8	15.4	1.82
RL-35	8.12	4	27.4	25.2	27.1	5.2	14.8	1.87
RL-36	8.11	3	27.3	24.9	24.5	4.9	16.7	1.86
RL-37	8.12	4	27.4	13.0	22.0	7.5	21.7	1.79

注) 登熟温度:出穂後 20 日間の日平均気温

断片を有する NL-22、第 10 染色体上に野生稻の置換染色体断片を有する NL-28 は、「コシヒカリ」や他の NLs 系統と比較して整粒比率が高く、白未熟粒発生率が低かった。NL-22、NL-28 はともに第 6 染色体はコシヒカリ型で固定しており、第 8 または第 10 番染色体の野生稻置換領域が白未熟粒率の抑制に関与すると考えられた。さらに NL-28 は NL-22 よりも白未熟粒の発生が少なかったことから、NL-28 を白未熟粒発生率抑制に関与する染色体領域の絞り込みに使用する材料とした。

(2) RLs

RLs 37 系統及び「コシヒカリ」の評価結果を表 2 に示した。出穂期は「コシヒカリ」が 8 月 8 日であったのに対し、RLs は 8 月 6 日から 8 月 18 日であった。登熟温度は「コシヒカリ」が 27.3℃であったのに対し、RLs は 27.0~27.4℃であった。出穂が著しく遅れた RL-12 と RL-18 は登熟温度が 27℃を下回ったため、また、RL-29 は分けつせず採種ができなかったため、評価の対象から除外した。

整粒比率は「コシヒカリ」が 25.1%であったのに対し、RLs

は 0~44.7%の変異を示した。「コシヒカリ」及び RLs のそれぞれの基部未熟粒発生率は 24.9%、0~36.9%、背白粒発生率は 4.9%、0~17.2%、乳白粒発生率は 13.3%、0~30.5%となった。整粒比率は第 7 染色体に野生稻染色体置換領域を有する RL-22 が最も高かった。第 3 染色体に置換領域を有する RL-10 は、粒長/粒幅比が 2.23 と細長く、穀粒判別機による調査では奇形粒と判別された結果「その他」の割合が高くなった。しかし、目視では「コシヒカリ」と比較して白未熟粒の発生は少なく整粒に相当する割合が高かったため(データ未掲載)、RL-10 及び RL-22 を白未熟粒発生抑制に関与する野生稻染色体領域の絞り込みに使用する材料として選定した。

3 白未熟粒発生率を抑制する染色体領域の探索

白未熟粒率を抑制する野生稻染色体領域の絞り込みに用いた系統群 N10s、R3s、R7s のグラフィカルジェノタイプを

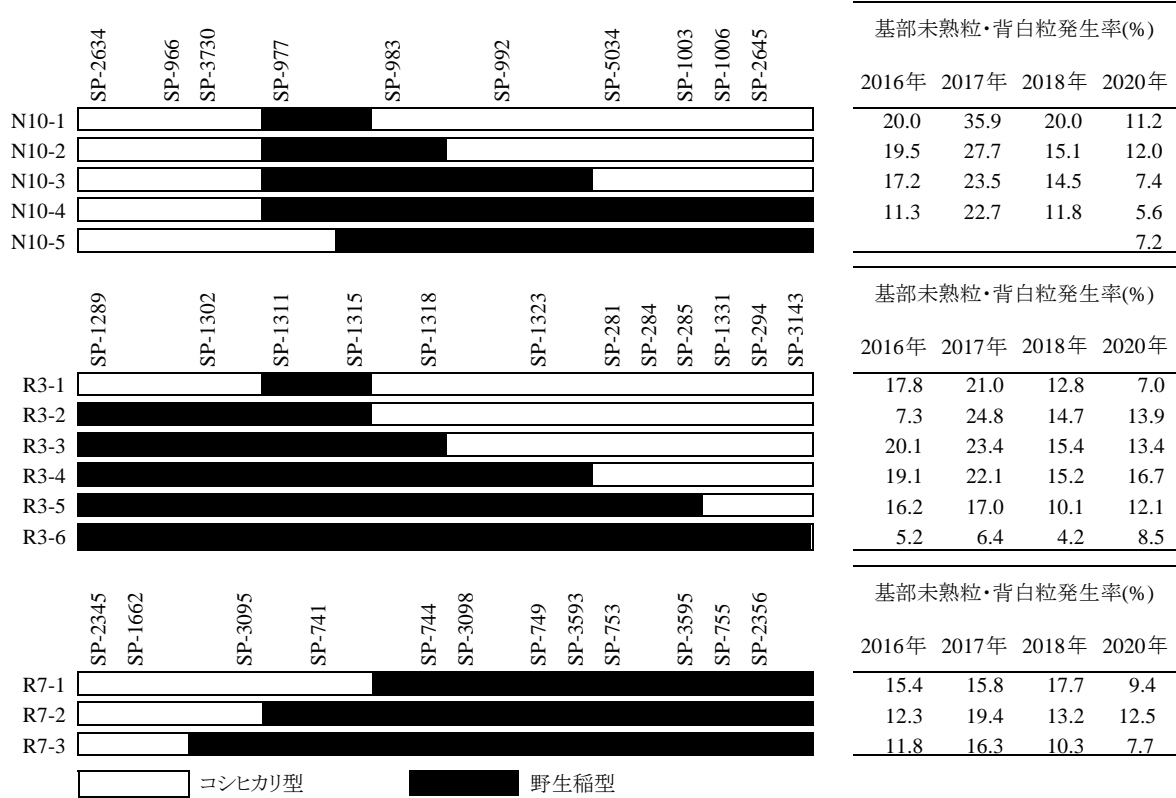


図3 N10s、R3s、R7sのグラフィカルジェノタイプ

表3 高温登熟耐性検定期間中の気象 (2016~18, 2020年)

年次	平均気温 平年差		出穂後20日間			
	7月	8月	平均 気温	平年差	日照 時間	平年比
	°C	°C	°C	°C	h/day	%
2016	+0.9	+1.1	27.2	+1.2	6.1	98
2017	-1.8	+0.2	26.4	+0.2	6.3	99
2018	+3.0	+2.0	27.2	+1.2	6.0	96
2020	-0.5	+2.4	28.5	+2.5	7.1	112

注) アメダス豊田観測所の気象データから算出

図3に示した。これらの系統群の評価を行った2016から2018年及び2020年の気象を表3、玄米の評価結果を表4に示した。どの供試系統も登熟温度が28°Cを超えており、白未熟粒が発生しやすい条件にあった。

(1) 白未熟粒発生率抑制に関する第10染色体の野生稲染色体領域の絞り込み

供試した5系統のうち、N10-4はN10sの中でも安定的に白未熟粒(基部未熟粒・背白粒)が少なく、2018年と2020年は整粒比率、基部未熟粒発生率について「コシヒカリ」との間に有意差が認められた。N10-5は2020年の検定のみであるが、N10-4と同等に「コシヒカリ」より有意に白未熟粒が減少し、整粒比率はN10-1、2、3よりも高かった。一方、N10-1、2、3は、2020年の検定のみ「コシヒカリ」より有意に白未熟粒発生率が減少したものの、置換領域が最も小さいN10-1は、2016年の背白粒比、2017年の基部未熟粒発生率及び背白粒発生

率、2018年の基部未熟粒発生率が「コシヒカリ」よりも高かった。また、N10-2とN10-3は、2016から2018年の基部未熟粒発生率が「コシヒカリ」よりわずかに減少しているものの、有意差はなかった。以上のことからN10-4、5が共通して有する第10染色体のDNAマーカーSP-992からSP-2645間(先端からの物理距離20.38-22.65 Mb)の範囲内に高温登熟条件での白未熟粒の発生抑制に関与する領域が存在すると考えられた。

(2) 白未熟粒発生率抑制に関する第3染色体の野生稲染色体領域の絞り込み

R3sのうち最も置換領域が小さいR3-1は、「コシヒカリ」より基部未熟粒の発生が少なく、特に2017年及び2020年の検定では有意差が認められた。一方、R3-1の置換領域の両側のより広い範囲に野生稲由来の領域を有するR3-2、R3-3、R3-4は、R3-1との有意差は認められないものの、2017年、2018年、2020年の検定で基部未熟粒発生率、背白粒発生率ともにR3-1よりやや高かった。このことから、R3-1の置換領域のSP-1302からSP-1318(先端からの物理距離6.66-10.46 Mb)の範囲内に白未熟粒抑制に関与する領域が存在すると示唆された。しかし、詳細はさらに領域を絞り込む必要がある。また、R3sのうち比較的大きい置換領域を有するR3-5、R3-6はR3-1よりさらに白未熟粒率が抑制され強い高温登熟耐性を示したため、この2系統に共通するSP-1323からSP-3143(先端からの物理距離11.07-13.98 Mb)にも白未熟粒発生率に関与する領域である可能性が示唆された。しかし、R3-6は粒長/粒幅比が2.05と長粒化し、相対的に整粒比率が減少したこと、粒形に関与する不良形質が近傍に存在し随伴して

表4 N10s, R3s, R7s の高温登熟耐性検定結果(2016~18, 2020年)

品種・系統名	2016年						2017年						2018年						2020年													
	出穂期	登熟温度	整粒粒比	基部未熟粒比	背白粒比	粒長/粒幅	出穂期	登熟温度	整粒粒比	基部未熟粒比	背白粒比	粒長/粒幅	出穂期	登熟温度	整粒粒比	基部未熟粒比	背白粒比	粒長/粒幅	出穂期	登熟温度	整粒粒比	基部未熟粒比	背白粒比	粒長/粒幅								
	月.日	°C	%	%	%	%	月.日	°C	%	%	%	%	月.日	°C	%	%	%	%	月.日	°C	%	%	%	%								
N10-1	8.16	30.4	7.3	13.0	7.1	1.84	8.15	30.2	7.2	24.4	11.6	1.89	8.17	28.8	36.5	16.2	3.8	1.81	8.19	30.4	38.0	6.2	**	5.1	1.90							
N10-2	8.17	30.2	7.8	14.9	4.6	1.88	8.16	30.2	6.0	17.0	10.7	1.89	8.18	28.8	28.8	10.8	4.3	1.83	8.19	30.4	36.7	6.2	**	5.8	1.93							
N10-3	8.16	30.4	7.4	11.2	6.0	1.88	8.15	30.2	5.7	16.0	7.6	1.93	8.17	28.8	40.1	10.8	3.7	1.87	8.19	30.4	43.4	4.4	**	3.0	**	1.96						
N10-4	8.16	30.4	12.7	8.7	2.6	1.86	8.14	30.2	19.7	15.1	7.5	1.95	8.17	28.8	52.0	*	8.3	*	3.4	1.86	8.20	30.2	60.6	**	3.3	**	2.4	**	1.93			
N10-5																				8.20	30.2	50.6	**	3.9	**	3.3	**	1.94				
R3-1	8.15	30.4	14.0	10.8	7.1	1.95	8.17	30.2	8.7	7.7	**	13.3	1.96	8.19	28.8	39.0	9.7	3.1	1.91	8.19	30.4	52.2	**	3.7	**	3.3	**	1.98				
R3-2	8.15	30.4	22.2	4.5	2.8	1.95	8.16	30.2	6.6	10.1	**	14.7	1.95	8.18	28.8	39.2	11.0	3.8	1.90	8.19	30.4	40.2	7.1	6.8	1.97							
R3-3	8.15	30.4	9.5	11.3	8.8	1.95	8.17	30.2	7.5	8.9	**	14.5	1.96	8.19	28.8	34.6	11.2	4.2	1.89	8.19	30.4	38.6	7.7	5.7	1.96							
R3-4	8.17	30.2	6.5	10.3	8.9	1.95	8.18	29.9	9.6	8.4	**	13.8	1.95	8.19	28.8	33.2	10.9	4.3	1.88	8.19	30.4	34.4	**	9.4	7.3	1.96						
R3-5	8.16	30.4	9.5	8.7	7.5	1.89	8.17	30.2	7.2	4.4	**	12.6	2.06	8.19	28.8	30.9	6.7	**	3.4	1.97	8.20	30.2	36.1	**	7.5	4.6	**	1.97				
R3-6	8.19	30.1	4.3	2.1	3.1	1.94	8.18	29.9	3.9	1.5	**	4.9	*	2.20	8.20	28.9	9.8	*	3.3	**	1.0	*	2.18	8.20	30.2	48.2	**	4.4	**	4.1	**	2.05
R7-1	8.22	29.7	16.5	8.7	6.7	1.86	8.19	29.8	9.6	5.1	**	10.7	1.90	8.21	28.9	21.2	11.8	5.9	1.81	8.21	30.1	40.3	4.5	**	4.9	1.96						
R7-2	8.20	29.9	14.7	7.2	5.1	1.87	8.18	29.9	11.1	10.7	*	8.8	1.91	8.18	28.8	35.3	9.6	3.6	1.82	8.20	30.2	47.7	**	7.7	4.8	1.92						
R7-3	8.23	29.5	25.7	7.3	4.5	1.82	8.20	29.6	16.3	10.4	**	5.9	1.89	8.22	28.7	37.3	7.5	*	2.7	1.81	8.23	29.7	50.6	**	5.4	**	2.3	**	1.90			
コシヒカリ	8.16	30.4	7.5	18.6	6.5	1.83	8.15	30.2	8.5	22.9		10.5	1.87	8.17	28.8	34.7	12.5	4.3	1.80	8.19	30.4	42.3	10.1	6.6	1.89							
(参考)なつきらり	8.17	30.2	16.2	9.0	8.3	1.91	8.14	30.2	10.8	9.3		11.9	1.96	8.18	28.8	45.7	7.7	3.4	1.86	8.19	30.4	49.5	5.4	5.0	1.95							

注1) Dunnett の検定で有意差あり *:P<0.05 **:P<0.01 注2) 登熟温度:出穂後20日間の日平均

いと推察された。

(3) 白未熟粒発生率抑制に関与する第7染色体の野生稻染色体領域の絞り込み

R7s の白未熟粒率は置換領域が大きいほど減少する傾向があり、置換領域が最も大きい R7-3 ほどの試験年次においても「なつきらり」と同程度に基部未熟粒と背白粒が減少した。置換領域が最も小さい R7-1 の背白粒発生率は「コシヒカリ」と同等であったが、基部未熟粒発生率は減少する傾向がみられた。

R7s の置換領域第7染色体 21.94-29.36 Mb は、「コシヒカリ」とインド型水稲品種「ハバタキ」を用いた CSSLs から見出された高温登熟耐性遺伝子 *Apq1* 座の座乗位置と同じ領域であり⁴⁾、R7s についても *Apq1* のホモログが存在する可能性がある。

4 野生稻 CSSLs の育種利用

野生稻は、栽培種と比較すると形態的・遺伝的に多様であり、野生稻そのものの形質評価からは収量性や玄米の外観品質等に関与する遺伝子の特定は困難である。しかし、CSSLs を利用することにより、遺伝背景がそろった状態で表現型を評価することが可能となり、野生稻の保有する有用遺伝子の探索に有効である¹⁴⁾。

本研究では、「コシヒカリ」を遺伝的背景とした野生稻 *O. nivara* 及び *O. rufipogon* の CSSLs を利用し、白未熟粒の発生抑制に関与する染色体領域の特定を試みた。その結果、*O. nivara* に由来する第10染色体の染色体領域、*O. rufipogon* に由来する第3、第7染色体の染色体領域の関与が推定された。このことから、野生稻 *O. nivara* 及び *O. rufipogon* は高温登熟耐性導入のための遺伝資源として有用であることが示された。今回供試した CSSLs の遺伝背景は「コシヒカリ」であることから、これらの系統は高温登熟耐性を日本稲に付与するための交配母本として利用できると考えら

れる。本県では、農業総合試験場が保管する遺伝資源から高温登熟耐性に優れる系統「TS-3」を見出し、高温登熟耐性品種「なつきらり」及び「愛知135号」の母本に利用している^{15,16)}。しかし、夏期の気温は近年さらに上昇傾向にあり、高温登熟耐性を一層の強化した品種の育成に向けて新たな遺伝資源の確保が重要である。本研究により見出された野生稻由来の高温登熟耐性を有する系統が、今後の品種育成のための遺伝資源として活用されることを期待したい。

ただし、育種利用に際しては、出穂期や粒形などの形質に「コシヒカリ」と差異が生じていたことに留意する必要がある。本研究において探索された高温登熟耐性に関与する領域の近傍に、出穂期や粒形を変える遺伝領域が存在する可能性がある。今後、野生稻の置換領域をより細分化した染色体置換系統を育成し、高温登熟耐性に関わる QTL を特定するとともに、選抜に有効な DNA マーカーの開発が必要である。また、本研究では出穂期の遅れにより登熟温度が27°Cを下回った *O. rufipogon* の系統の一部は対象から除外したことから、白未熟粒発生との関連が特定できない染色体領域が生じた。評価から除外した領域については、戻し交配により置換領域をさらに細分化し、出穂期に関与する領域を除いた後に、高温登熟耐性の評価を行う必要がある。

引用文献

1. 農林水産省政策統括官付穀物課農産物検査班. 米穀の農産物検査結果. [https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/\(2021.4.12参照\)](https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/(2021.4.12%20参照))
2. 西村実, 梶亮太, 小川紹文. 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(2000)
3. 田畑美奈子, 飯田幸彦, 大澤良. 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(2005)
4. Murata Kazumasa, Iyama Yukihide, Yamaguchi Takuya, Ozaki Hidenobu, Kidani Yoshinori and Ebitani Takeshi. Identification of a novel gene (*Apq1*) from the indica rice cultivar 'Habataki' that improves the quality of grains produced under high temperature stress. *Breeding Science*. 64, 273-281(2014)
 5. Takehara Kana, Murata Kazumasa, Yamaguchi Takuya, Yamaguchi Kohei, Chaya Genki, Kido Shintaro, Iwasaki Yukimoto, Ogiwara Hitoshi, Ebitani Takeshi and Kotaro Miura. Thermo-responsive allele of sucrose synthase 3 (*Sus3*) provides high-temperature tolerance during the ripening stage in rice (*Oryza sativa* L.). *Breeding Science*. 68, 336-342(2018)
 6. Kobayashi Asako, Sonoda Junya, Sugimoto Kazuhiko, Kondo Motohiko, Iwasawa Norio, Hayashi Takeshi, Tomita Katsura, Yano Masahiro and Toyohiro Shimizu. Detection and verification of QTLs associated with heat-induced quality decline of rice (*Oryza sativa* L.) using recombinant inbred lines and near-isogenic lines. *Breeding Science*. 63, 339-346(2013)
 7. IPCC 第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約(気象庁訳). 17-27(2015)
 8. Hirabayashi Hideyuki, Sato Hiroyuki, Nonoue Yasunori, Kuno-Takemoto Yoko, Takeuchi Yoshinobu, Kato Hiroshi, Nemoto Hiroshi, Ogawa Tsugufumi, Yano Masahiro, Imbe Tokio and Ando Ikuo. Development of introgression lines derived from *Oryza rufipogon* and *O. glumaepatula* in the genetic background of japonica cultivated rice (*O. sativa* L.) and evaluation of resistance to rice blast. *Breeding Science*. 60, 604-612(2010)
 9. Furuta Tomoyuki, Uehara Kanako, Rosalyn B. Angeles-Shim, Junghyun Shim, Ashikari Motoyuki and Takashi Tomonori. Development and evaluation of chromosome segment substitution lines (CSSLs) carrying chromosome segments derived from *Oryza rufipogon* in the genetic background of *Oryza sativa* L. *Breeding Science*. 63, 468-475(2014)
 10. Furuta Tomoyuki, Uehara Kanako, Rosalyn B. Angeles-Shim, Junghyun Shim, Nagai Keisuke, Ashikari Motoyuki and Takashi Tomonori. Development of chromosome segment substitution lines harboring *Oryza nivara* genomic segments in Koshihikari and evaluation of yield-related traits. *Breeding Science*. 66, 845-850(2016)
 11. Bessho-Uehara Kanako, Furuta Tomoyuki, Masuda Kengo, Yamada Shuto, Rosalyn B. Angeles-Shim, Ashikari Motoyuki and Takashi Tomonori. Construction of rice chromosome segment substitution lines harboring *Oryza barthii* genome and evaluation of yield-related traits. *Breeding Science*. 67, 408-415 (2017)
 12. 平林秀介, 竹本陽子, 竹内善信, 石井卓朗. 水稻品種「いただき」を遺伝的背景とする*Oryza rufipogon*染色体断片導入系統群を用いた高温耐性QTLの探索. 育種学研究. 16(別1), 194(2014)
 13. 若松謙一, 佐々木修, 上菌一郎, 田中明男. 暖地水稻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(2007)
 14. Ebitani, T., Y. Takeuchi, Y. Nonoue, T. Yamamoto, K. Takeuchi and M. Yano. Construction and evaluation of chromosome segment substitution lines carrying overlapping chromosome segments of indica rice cultivar 'Kasalath' in a genetic back-ground of japonica elite cultivar 'Koshihikari'. *Breeding Science*. 55, 65-73(2005)
 15. 伊藤晃, 加藤満, 杉浦和彦, 船生岳人, 野々山利博, 辻孝子, 中嶋泰則, 中村充, 加藤恭宏, 城田雅毅, 加藤裕司. 水稻高温耐性新品種「愛知123号」の育成. 愛知農総試研報. 47, 31-39(2015)
 16. 濱頭葵, 井手康人, 杉浦和彦, 中村充, 津田健吾, 加藤満, 池田彰弘, 杉浦直樹, 伊藤晃, 松本祐保, 水上優子, 森賢一郎, 渡邊靖治, 安藤祐嗣, 瀧川貴大, 嶋田稔貴, 中嶋泰則, 根津崇. 高温登熟性を有する水稻早生系統「愛知135号」の育成. 愛知農総試研報. 52, 31-39(2020)