

長野県内の低暖地における水稻極多収品種「北陸 193 号」および その後代系統に関する乾物生産・収量構成要素の特徴

細井淳¹⁾・岡村昌樹²⁾・長田健二³⁾・小林伸哉⁴⁾

近藤始彦⁵⁾・小松晃⁶⁾・中込弘二⁷⁾・前田英郎⁷⁾

(¹⁾ 長野県農業試験場, (²⁾ 農研機構中日本農業研究センター, (³⁾ 農研機構西日本農業研究センター, (⁴⁾ 農研機構作物研究部門,

(⁵⁾ 名古屋大学, (⁶⁾ 農研機構生物機能利用研究部門, (⁷⁾ 農林水産省技術会議事務局)

要旨: 水稻極多収品種「北陸 193 号」およびこの品種の後代 2 系統を供試し, 国内最多収地帯である長野県内の低暖地で 3 年間にわたり栽培試験を行った。それらの生育, 乾物生産特性, 収量および収量構成要素について比較検討した。生育良好な複数年次において, 粗玄米収量約 1200 g m^{-2} を実証した時の収量形成に関する詳細が明らかとなった。新規 2 系統は栄養成長期間の短縮に伴い地上部全乾物重は小さく, 穂揃期までに茎部に蓄積した非構造的炭水化物の含有量と登熟期の乾物増加の和で表される登熟期間に穂に供給可能な炭水化物の総量は少なくなる傾向にあった。「北陸 193 号」と比較した収量構成要素において, 系統 A では全粒数が多いが, 精玄米千粒重が軽いため, 両者の積で表されるシンク容量は同等かわずかに小さかった。登熟歩合も「北陸 193 号」より同等かわずかに低く, その結果, 精玄米収量は少なかった。一方, 系統 B では全粒数は同等で, 精玄米千粒重が重く, シンク容量が増加していたが, 登熟歩合は低かった。その結果, 系統 B は早生化により生育期間が短いにもかかわらず「北陸 193 号」と同等の収量を示し, 登熟期の低温回避の観点から有望と判断された。

キーワード: シンク容量, 水稻育種, 多収米, 長野県。

近年, 国内の水稻生産現場では飼料米用途を目的とした極多収品種導入への期待が続いている。最近国内で育成された代表的な品種としては, 「タカナリ」(井辺ら 2004), 「北陸 193 号」(Goto ら 2009), 「モミロマン」(平林ら 2010) が挙げられ, これまで主に国内の温暖地における収量特性に関する知見が蓄積されてきた。そこでの粗玄米収量をみると, 概ね 1000 g m^{-2} で頭打ちとなっている傾向がみられる(長田ら 2016)。一方, 水稻平均単収が国内最高水準地域の長野県において過去に行われた品種比較栽培試験では, 供試した極多収品種の中で「北陸 193 号」が最も多収で, 試験を行った 3 ケ年平均で 1000 g m^{-2} を超える粗玄米収量が得られた(酒井ら 2011)。そこで著者らは「北陸 193 号」を用いて国内多地点栽培試験を行ったところ, 長野県において 3 ケ年平均で 1200 g m^{-2} を超える粗玄米収量が得られた(Okamura ら 2022)。これらの結果から, 日射量が豊富で昼夜温差の大きい長野県内の低暖地(長野県の北信地域において概ね標高 400 m 以下の地帯)は, 過去に知見が比較的多く蓄積されてきた温暖地よりも潜在的な収量が高いことが示されたとともに, 近年育成された極多収品種の中では「北陸 193 号」が飼料米用として最も有望な品種と判断された。

一方, 長野県において「北陸 193 号」は出穂期が遅く成熟期が極晩生に属する品種のため, 登熟期に低温条件が続いた年では著しい登熟不良による低収に至り, 年次による収量変動が大きかった(酒井ら 2015)。冷涼な内陸地での

栽培や温暖地の晩植条件などによる登熟期の低温による収量低下のリスクを軽減し, 極多収品種の普及を加速化させるためには, このような登熟不良に伴う大幅な収量減少の回避を図る必要がある。それには早生化への改良により出穂期以降の低温への遭遇を少なくし, 良好な登熟条件を可能な限り長期間維持することが解決のひとつである。一方, Okamura ら (2022) は, 長野県での「北陸 193 号」は登熟期間に穂に供給可能な炭水化物が余剰となっているため, 収量構成要素のうちシンク容量(全粒数と精玄米千粒重の積)が多収への制限要因となっている可能性を示している。よって, 良好な登熟条件下で十分な収量形成を維持するためには, 早生化とともにシンク容量の改良を加えることで更なる収量増が達成できると考えられる。しかし, 現在実施されている栽培技術では「北陸 193 号」の出穂期を大幅に早めることや全粒数の増加, 玄米の大粒化などによるシンク容量の拡大は品種特性上困難である。そのため, 「北陸 193 号」を超える収量を長野県で安定的に得るには, 早生化およびシンク容量を拡大した系統の作出が新たに必要である。一方, 早生化に伴う生育期間の短縮による地上部乾物生産量の変化やシンク容量との関係についての詳細は明らかとなっていない。

そこで本試験では, 「北陸 193 号」を交配親として早生化およびシンク容量の拡大を目的に育成した粒数型系統と大粒型系統の 2 系統を供試した。それらについて乾物生産や収量構成の面からの解析を行うことで, 国内において極

多収品種のポテンシャルを最大限に発揮できる長野県内の低暖地での育種や栽培上での課題を「北陸 193 号」と比較しながら考察した。

材料と方法

1. 供試系統および耕種概要

長野県須坂市に所在する長野県農業試験場八重森庁舎内(標高 334 m, 土壤統群は中粗粒グライ土, 北緯 36°39′48.1″, 東経 138°17′20.4″)の試験圃場で, 2016 年から 2018 年の 3 ケ年にわたり栽培試験を行った。「北陸 193 号」を標準品種とし, 農研機構中日本農業研究センターで開発した系統 A, および農研機構西日本農業研究センターで開発した系統 B の 2 系統を供試した。前者は, “北陸 193 号/収 7613” の交配組み合わせより選抜され, 単位面積あたりの全初数が多粒数型の特徴を有し, 後者は, “べこあおば/北陸 193 号//北陸 193 号” の交配組み合わせより選抜され, 玄米 1 粒あたりの重量が大きい大粒型の特徴を有する。両系統ともに育成地では「北陸 193 号」より出穂期が早い。標準品種の「北陸 193 号」については, 既報 (Okamura ら 2022) と同一のデータを使用し, 他 2 系統についても同様の方法で栽培した。すなわち, 移植日はそれぞれ 2016 年 5 月 19 日, 2017 年 5 月 12 日, 2018 年 5 月 10 日とし, 播種後約 30 日の中苗を 1 株 3 本で手植えした。栽植密度は 22.2 株 m^{-2} (株間 15 cm \times 条間 30 cm) とし, 1 区画あたり面積は 9.6 m^2 (条間長 2.4 m \times 株間長 4.0 m) で各 3 反復とした。 m^2 あたりの施肥条件は, 完熟稲わら堆肥 2 kg, 窒素施用量は基肥 7.0 g, 分げつ促進追肥 3.0 g (6 月中旬), 幼穂形成期追肥 4.5 g (幼穂長 2 mm 程度の時期), 穂ばらみ期追肥 4.5 g (幼穂形成期追肥より 14 日後) の分肥体系で合計 19.0 g とした。リン酸およびカリの m^2 あたりの総施用量は, それぞれ 24.0 g および 20.5 g とした。これら基肥および分げつ促進追肥には, BB 肥料 C-046 (JA アグリエール長野, N : P_2O_5 : K_2O = 10 : 24 : 16), 幼穂形成期追肥および穂ばらみ期追肥は BB 肥料 NKC201 (JA アグリエール長野, N : P_2O_5 : K_2O = 20 : 0 : 10) を使用した。

2. 調査項目および調査方法

性状調査においては, 達観での観察を行い, 各試験区全体の穂の 50% が出穂に達した期日を出穂期, 90% 以上となった期日を穂揃期としてそれぞれ把握した。また, 初帯緑色初歩合が概ね 10% を下回る期日として成熟期を把握した。生育が中庸な 1 列中の隣り合う 10 株を選定し, 最高分げつ期の茎数および成熟期の穂数を計数し, 稈長と穂長を測定した。脱粒性は成熟期の触診により判定した。

乾物調査では, 穂揃期および成熟期にそれぞれ 10 株ずつ茎の基部まで抜き取り, その後根を切断して土を洗い落とすことでサンプリングした。サンプリング後, 温度 80°C で 3 日間の熱風通風乾燥後の重量を計量して乾物重とし, 部位別の乾物比率により構成率を算出した。成熟期では 10

株中の 2 株についてサンプリング時に穂, 葉鞘を含む稈, 生葉および枯葉の 4 つの部位別に分解し, 地上部全乾物重に占める割合を算出した。

成分調査では, 高速振動試料粉碎機 (株式会社シー・エム・ティ, TI-100 型) により粉碎した乾物試料を供試した。茎および葉鞘部における非構造性炭水化物 (NSC) 含有量は Okamura ら (2016) の方法に従い, デンプン, ショ糖, ブドウ糖, 果糖を酵素法により定量し, それらの和を NSC 含有量とした。また, 水稻では出穂期までに稈・葉鞘に蓄積した NSC 含量と登熟期間の乾物増加量の和が登熟期間に穂へ供給可能な炭水化物の総量として, 登熟歩合と密接な関係があると考えられている (Horie ら 1997, 楠谷ら 1999, Morita and Nakano 2011, Yagioka ら 2021)。そこで本研究では穂揃期までに蓄積した NSC 含有量と登熟期間の乾物増加量の和を収量やシンク容量と比較できるように水分含有率 15% に換算して算出した。

収穫物調査では, 1 区あたり 60 株を成熟期にサンプリング対象とした。供試した 1 品種 2 系統は脱粒性を有するものを含むため, 初脱粒を防ぎながら地上部を刈り取った。刈り取った収穫物は, 大きさ約 60 cm \times 80 cm の網状コンバイン袋 (田中産業製, DX ライスロン[®]) に 1 袋あたり 10 株ずつ 1 束として入れ, 屋根付き網室にて約 1 ヶ月間自然乾燥した。乾燥した地上部収穫物は採用用脱穀機 (大屋丹藏製作所製, DASH-60 型) を用いて脱穀した。抜き落とし物を全て回収した後, 藁残さを除去した粗初重を計量した。粗初について均分器を用いて一部を取り分けて計数し, 全初量を算出した。粗初は初すり機 (大竹製作所製, オータケミニダップ FC4-M 型) により玄米に調整し, 粗玄米重を計量した。粗玄米を検査用ふるい (不二金属工業製, 大型タテ目 1.8 mm) で調製し, 精玄米重を計量した。また精玄米における千粒重を測定した。精玄米重と精玄米千粒重より精玄米数を算出し, 全初数と精玄米数との比により登熟歩合を算出した。精玄米について, 穀粒水分計 (ケツト科学研究所製, ライスタ f2 型) により玄米水分を計測し, 水分 15% 換算による収量を算出した。

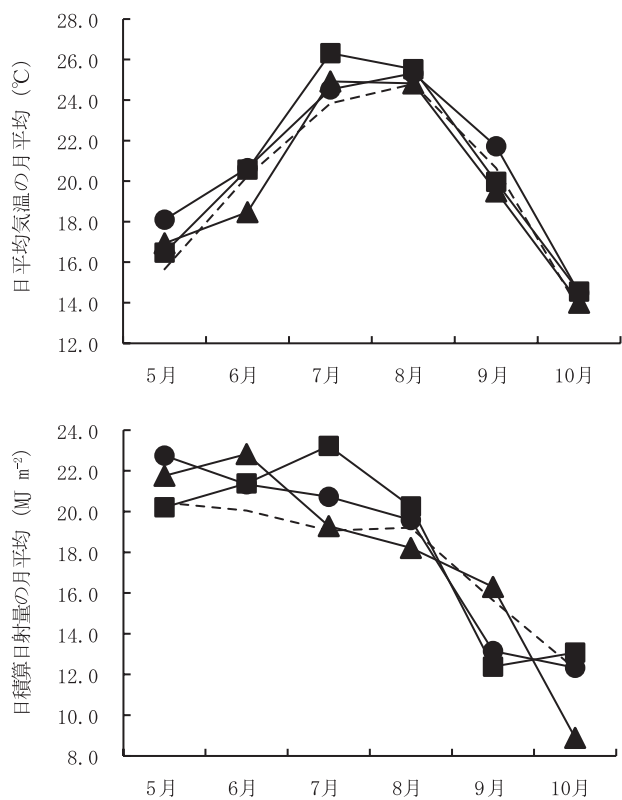
生育条件の把握に必要な気象データは, 同試験場小河原庁舎に設置した気象観測装置 (M.C.S 社製, FAST-Multi 型) により取得した。なお, 当該気象装置が設置された 2002 年から 2015 年まで 14 年間のデータのうち, 最低値と最高値を除く 12 年分の値を平均し, これを平年値として扱った。

統計処理はソフトウェア「R」(R Core Team 2017) を用いて行った。分散分析は各形質を従属変数, 年次および品種・系統を独立変数として行い, Tukey の多重比較により品種・系統間差異を検討した。

結 果

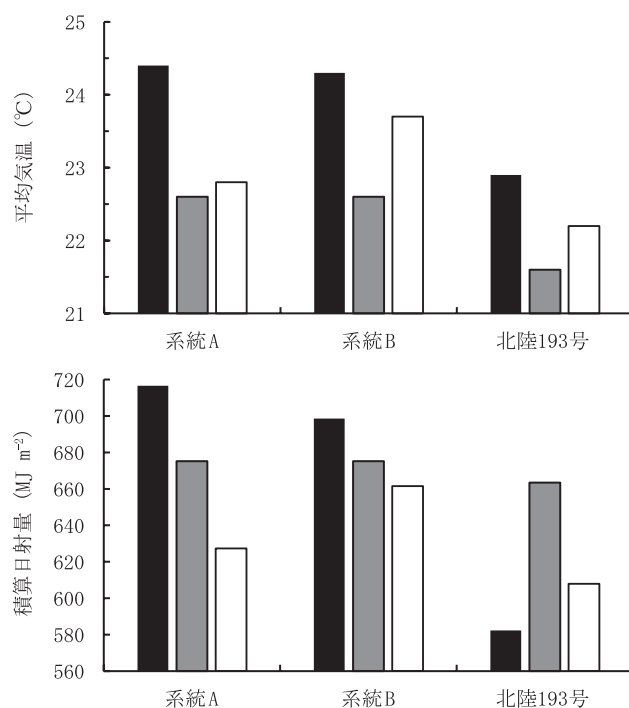
1. 生育環境条件

栽培試験を行った 3 ケ年および平年における 5 月から 10 月の日平均気温および日積算日射量の月毎の平均の推



第1図 試験期間中の気温および日射量の推移。

●：2016年，▲：2017年，■：2018年，---：平年値。



第2図 各供試系統・品種における出穂期以降40日間の平均気温および積算日射量の比較。

■：2016年，■：2017年，□：2018年。

移について第1図にまとめた。平年値と比べて、2016年は、生育期間全般を通じて気温が高く推移した。日射量は9月で少なくなったものの、気温が高い条件が晩秋まで続いた。2017年は、6月で低温傾向となり、8月は日射量が少なかった。2018年は、7月と8月で最も高温となり日射量も多く、9月は低温傾向で日射量も少なかった。また、2016年から2018年における5月から10月までの1ヶ月毎の気象概況（注：長野地方気象台提供、長野県の気象概況2016, 2017, 2018）を参照としたところ、概ね同様の傾向であった。

各系統・品種における出穂期以降40日間の気象条件について第2図にまとめた。「北陸193号」における平均気温は、22.9℃（2016年）、21.6℃（2017年）、22.2℃（2018年）であった。一方、供試した2系統においては、系統Aで24.4℃（2016年）、22.6℃（2017年）、22.8℃（2018年）、系統Bで24.3℃（2016年）、22.6℃（2017年）、23.7℃（2018年）であった。また、「北陸193号」の積算日射量は、582.3 MJ m⁻²（2016年）、663.4 MJ m⁻²（2017年）、607.9 MJ m⁻²（2018年）であった。一方、系統Aでは716.6 MJ m⁻²（2016年）、675.2 MJ m⁻²（2017年）、627.3 MJ m⁻²（2018年）、系統Bでは698.6 MJ m⁻²（2016年）、675.2 MJ m⁻²（2017年）、661.5 MJ m⁻²（2018年）であった。以上から、「北陸193号」と比べて2系統の登熟期は高温で日射量が多い環境条件であった。

2. 生育特性

供試した品種・系統の生育特性について、第1表にまとめた。系統A、系統Bともに「北陸193号」よりそれぞれ7日および8日出穂期が早かった。これら系統の草姿は交配親である「北陸193号」とは類似せず、それぞれの系統特有の形態的特徴が観察された。すなわち系統Aは最高分げつ期の茎数がやや少なく脱粒性が難であり、系統Bは穂長が短く株が開張する特徴がみられた。

3. 乾物生産特性

供試した系統・品種の地上部全乾物重、成熟期における乾物分配率、登熟期の乾物増加量、稈・葉鞘のNSC含有量、NSC含有量と登熟期の乾物増加量の和について、第2表にまとめた。本試験における「北陸193号」の3ヶ年平均の地上部全乾物重は、穂揃期で1988 g m⁻²、成熟期で3364 g m⁻²となった。供試した新規2系統の地上部全乾物重は、「北陸193号」と比較して穂揃期で約200 g m⁻²、成熟期で約400 g m⁻²小さかったが、地上部全乾物重に占める穂重の割合はいずれも約50%で「北陸193号」の45.8%より高かった。登熟期の乾物増加量には系統・品種間で有意な差は認められなかった。一方、穂揃期のNSC含有量は新規2系統で「北陸193号」より少なく、穂揃期のNSC含有量と登熟期の乾物増加量の和は、「北陸193号」、「系統B」、「系統A」の順で大きかった。

第1表 供試系統・品種の生育特性.

系統・品種名	年次	出穂期 (月・日)	穂揃期 (月・日)	成熟期 (月・日)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	最高分げつ期 茎数 (本 m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	倒伏 ¹⁾ (9段階)	脱粒性 ²⁾ (7段階)
系統 A	2016	8.08	8.10	10.10	94	30.2	680	364	無	難
	2017	8.09	8.11	10.10	81	29.4	501	302	無	難
	2018	8.13	8.16	10.13	94	28.6	607	354	無	やや難
系統 B	2016	8.09	8.12	10.06	79	23.5	719	406	極微	易
	2017	8.09	8.12	10.12	73	23.1	553	326	極微	易
	2018	8.09	8.13	10.07	84	22.5	790	387	極微	易
北陸 193 号	2016	8.17	8.19	10.18	92	28.7	724	365	無	やや易
	2017	8.16	8.18	10.18	81	29.4	630	323	無	やや易
	2018	8.17	8.21	10.23	94	29.5	719	379	無	やや易
系統 A		8.10	8.12	10.11	90 ^a	29.4 ^a	596 ^b	340 ^{ns}	無	難
系統 B	平均	8.09	8.12	10.08	79 ^b	23.0 ^b	687 ^a	373 ^{ns}	極微	易
北陸 193 号		8.17	8.19	10.20	89 ^a	29.2 ^a	691 ^a	356 ^{ns}	無	やや易
分散分析	年次 (Y)	—	—	—	***	ns	***	***	—	—
	系統・品種 (C)	—	—	—	***	***	*	ns	—	—
	Y × C	—	—	—	*	ns	ns	ns	—	—

1) 圃場での遠観観察による。無～甚まで9段階の評価とした。

2) 成熟期の穂を握りしめにより判定。極難～極易まで7段階の評価とした。

平均値に付した異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により 5%水準で有意差あり、ns は有意差なしを示す。

分散分析の ***, **, *, はそれぞれ 0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり、ns は 5%水準で有意差なしを示す。

第2表 供試系統・品種の地上部全乾物重、乾物分配率、乾物増加量、NSC 含有量。

系統・品種名	年次	地上部全乾物重 (g m ⁻²)		成熟期の乾物分配率 (%)			乾物増加量 ¹⁾ (g m ⁻²)	NSC 含有量 ²⁾ (g m ⁻²)		NSC + 乾物増加量 ³⁾ (g m ⁻² 水分 15%換算)
		穂揃期	成熟期	穂	葉 (枯葉含)	稈・葉鞘	穂揃期～成熟期	穂揃期	成熟期	
系統 A	2016	1986	3309	49.8	14.5	35.7	1323	198	144	1521
	2017	1446	2532	50.6	11.5	37.9	1086	89	125	1174
	2018	1889	3041	47.5	14.5	38.0	1152	218	106	1370
系統 B	2016	1979	3203	52.8	15.0	32.2	1224	226	125	1450
	2017	1498	2563	55.1	11.1	33.8	1065	99	67	1164
	2018	1710	3088	47.6	14.5	37.8	1378	192	149	1570
北陸 193 号	2016	2257	3650	45.1	14.3	40.6	1393	270	295	1663
	2017	1666	2817	49.3	13.3	37.4	1151	163	169	1314
	2018	2042	3625	42.9	14.1	43.0	1583	273	231	1856
系統 A		1774 ^b	2961 ^b	49.3 ^a	13.5 ^{ns}	37.2 ^b	1187 ^{ns}	168 ^b	125 ^b	1355 ^b
系統 B	平均	1729 ^b	2951 ^b	51.8 ^a	13.5 ^{ns}	34.6 ^b	1222 ^{ns}	172 ^b	114 ^b	1395 ^{ab}
北陸 193 号		1988 ^a	3364 ^a	45.8 ^b	13.9 ^{ns}	40.3 ^a	1376 ^{ns}	235 ^a	232 ^a	1611 ^a
分散分析	年次 (Y)	***	***	***	***	**	*	***	*	**
	系統・品種 (C)	***	***	***	ns	***	ns	***	***	*
	Y × C	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns

1) 地上部全乾物重の増加量を示す。

2) 稈・葉鞘部の含有量を示す。

3) ソース量の指標として出穂期の茎部 NSC 含有量と穂揃期から登熟期の乾物増加量の和を水分 15%に換算した。

表中の平均値に付したアルファベット、分散分析の符号は第1表と同じ。

第3表 供試系統・品種の収量および収量構成要素.

系統・品種名	年次	粗玄米収量 (g m^{-2})	精玄米収量 (g m^{-2})	収量構成要素				シンク容量 ¹⁾ (g m^{-2})
				1穂初数 (粒穂 ⁻¹)	全初数 (粒 m^{-2})	精玄米 千粒重 (g)	登熟 歩合 (%)	
系統 A	2016	1315	1234	183	71525	21.6	80.0	1544
	2017	1041	987	174	55198	21.2	84.6	1167
	2018	1197	1119	188	64324	21.7	80.4	1393
系統 B	2016	1332	1249	159	63026	24.6	80.7	1550
	2017	1204	1116	182	59957	24.6	75.6	1476
	2018	1218	1115	163	61669	25.3	71.4	1560
北陸 193 号	2016	1316	1279	167	64037	23.0	86.6	1476
	2017	1153	1116	178	57095	23.4	83.6	1335
	2018	1229	1172	168	61419	24.0	79.6	1473
系統 A		1184 ^a ± 137.4	1113 ^b ± 81.3	182 ^{ns} ± 7.1	63682 ^a ± 8182	21.5 ^c ± 0.3	81.7 ^a ± 2.5	1368 ^b ± 189.7
系統 B	平均	1251 ^a ± 70.2	1160 ^{ab} ± 77.1	168 ^{ns} ± 12.3	61551 ^{ab} ± 1538	24.8 ^a ± 0.4	75.9 ^b ± 4.7	1529 ^a ± 45.9
北陸 193 号		1233 ^{ab} ± 81.6	1189 ^a ± 82.8	171 ^{ns} ± 6.1	60850 ^b ± 3506	23.5 ^b ± 0.5	83.3 ^a ± 3.5	1428 ^b ± 80.6
分散分析	年次 (Y)	***	***	ns	***	***	**	***
	系統・品種 (C)	*	*	ns	*	***	***	***
	Y \times C	ns	ns	ns	**	ns	*	**

1) 全初数と精玄米千粒重との積により計算した.

表中の平均値に付したアルファベット, 分散分析の符号は第1表と同じ. \pm の数値は標準偏差を示す.

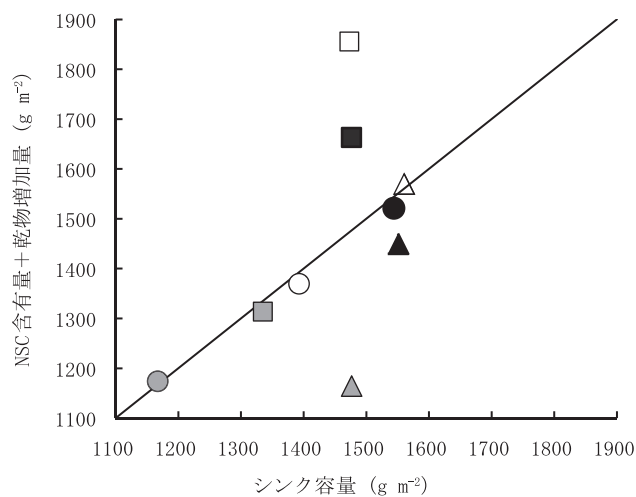
4. 収量および収量構成要素

供試した系統・品種の収量, 収量構成要素について, 第3表にまとめた. 標準品種の「北陸 193 号」における3ヶ年平均の粗玄米収量および精玄米収量は, それぞれ 1233 g m^{-2} および 1189 g m^{-2} となった. 供試した系統・品種の中で系統 A の3ヶ年平均精玄米収量は 1113 g m^{-2} となり「北陸 193 号」より有意に少なかった. 系統 B の3ヶ年平均精玄米収量は 1160 g m^{-2} で「北陸 193 号」と有意な差はなかった. 3ヶ年平均の収量構成要素では, 「北陸 193 号」と比較して系統 A では全初数が多いが, 精玄米千粒重が軽いため, シンク容量には有意な差が認められず, 登熟歩合にも差はなかった. 系統 B では全初数は同等で, 精玄米千粒重が重いため, シンク容量は「北陸 193 号」より大きかったが, 登熟歩合は有意に低かった.

シンク容量と, 穂揃期における NSC 含有量と登熟期における乾物増加量の和との関係を第3図に示した. 「北陸 193 号」では, NSC 含有量と乾物増加量の和がシンク容量を上回る傾向を示した一方, 新規2系統では, いずれも NSC 含有量と乾物増加量の和がシンク容量とほぼ等しいか, 下回る傾向にあった.

考 察

2016 年は全期間にわたって高温で推移し, 9 月を除き平年以上の日射量を確保した結果, 旺盛な生育かつ良好な登熟条件に至ったと思われた. 2017 年は6月の低温により移植後の活着や生育初期の分けつ増加の遅延が顕著であり,



第3図 シンク容量と NSC 含有量(穂揃期)と乾物増加量(登熟期)の和との関係.

●○△: 系統 A, ▲△△: 系統 B, ■□□: 北陸 193 号.
黒塗りは 2016 年, 網掛けは 2017 年, 白抜きは 2018 年.
実線は $Y=X$ を示す.

8 月の低日射量により出穂期前後の同化に負の影響を及ぼしたと思われた. 2018 年は7月と8月が高温・高日射量条件となったため出穂期までは生育良好であったものの, 9 月は低温・低日射量条件により登熟不良が起きたと思われた. 以上より, 試験を実施した年度ごとの生育環境は, 2016 年は極めて良好, 2017 年はやや不良, 2018 年はやや良好と判断された(第1図). 酒井ら(2015)は, 長野県で

過去に実施した「北陸 193 号」の栽培試験において、出穂期以降 40 日間の平均気温が 21°C 以下になると粗玄米収量が 1000 g m^{-2} を下回ることを述べている。本試験における「北陸 193 号」の出穂期以降の 40 日間の平均気温は約 $21.5\sim 23.0^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、 21°C を下回ることにはなかった (第 2 図)。一方、供試した 2 系統においてはその範囲が約 $22.5^{\circ}\text{C}\sim 24.5^{\circ}\text{C}$ にあり、これら 2 系統は出穂期の遅い「北陸 193 号」と比べて 0.6°C から 1.5°C の範囲で高く、本試験を行った「北陸 193 号」の 3 ヶ年よりも冷涼な登熟条件であっても登熟期の低温を回避できる可能性が高いことが示唆された。また、日射条件について、「北陸 193 号」の出穂期以降の 40 日間の積算日射量は、約 $580\sim 665\text{ MJ m}^{-2}$ の範囲であった (第 2 図)。一方、供試した新規 2 系統においてその範囲は、系統 A では約 $625\sim 720\text{ MJ m}^{-2}$ 、系統 B では約 $660\sim 700\text{ MJ m}^{-2}$ にあり、「北陸 193 号」と比べて 11.8 MJ m^{-2} から 134.3 MJ m^{-2} の間で全て上回ったため、日射条件においても有利な条件にあると言えた (第 2 図)。以上から、早生化への改良は長野県の温暖地での登熟温度と日射の両面において、より好条件の登熟環境を維持できる点で有利と判断された。

基準品種「北陸 193 号」の成熟期における地上部全乾物重について、過去に行われた長野県での栽培試験では、2009 年に窒素施用量 14.0 g m^{-2} の施肥条件で穂揃期 1507 g m^{-2} 、成熟期で 3234 g m^{-2} (注：長野県農業試験場 2009, 作物栽培に関する試験成績書)、2010 年に 12.2 g m^{-2} の施肥条件で穂揃期 2312 g m^{-2} 、成熟期で 2789 g m^{-2} (注：長野県農業試験場 2010, 作物栽培に関する試験成績書) の値が得られている。長野県の過去の結果と比較すると、本試験の「北陸 193 号」の値は穂揃期で概ね 2009 年と 2010 年の平均である 1910 g m^{-2} と同程度、成熟期ではそれらを上回る結果となった (第 2 表)。本試験では過去の試験よりも窒素施肥量が最も多い多肥条件となっており、成熟期まで肥沃な土壤環境を維持したことより地上部全乾物重量が高くなったと考えられた。以上より、本試験における新規系統の地上部乾物重は、系統および品種の乾物生産能力を最も顕在化した評価であったと判断された。一方、新規 2 系統の穂揃期および成熟期の地上部全乾物重は「北陸 193 号」よりも有意に低く、穂に供給可能な炭水化物の総量に相当する穂揃期の NSC 含有量と登熟期の乾物増加量の和は「北陸 193 号」を上回らなかった (第 2 表)。この現象は早生化による生育期間の短縮が主たる原因と考えられたものの、本研究の結果により特定することはできなかった。早生化に加えて生理生態的な要因が複合的に関与している可能性があり、群落形成や光環境などを含めた詳細な解析や、新たに作出される「北陸 193 号」の交配後代を供試した同様の検証、遺伝的な解析などが今後の課題である。

収量について、長野県以外の温暖地での「北陸 193 号」を用いた過去の知見では、窒素施用量 $17.0\sim 18.0\text{ g m}^{-2}$ の施肥条件の広島県福山市で粗玄米収量 1073 g m^{-2} が多収

水準であった (長田ら 2012)。また、長野県での過去の知見では、窒素施用量が 9.7 g m^{-2} の施肥条件で粗玄米収量 1034 g m^{-2} であった (酒井ら 2011)。本試験の結果はこれらの収量を 200 g m^{-2} 程度上回っており (第 3 表)、国内で最高収量水準の収量性であった。

精玄米収量 1100 g m^{-2} 水準の比較の中で、系統 A では「北陸 193 号」より一穂粒数が多くなる傾向にあるため、全粒数が有意に多かった。しかしながら精玄米千粒重は大きく低下し、結果としてシンク容量は「北陸 193 号」と同等かわずかに小さくなっていた。また登熟歩合も同等かわずかに小さくなっていたため、収量は有意に低かった。粒数の増大による精玄米千粒重の減少は粒数に関する遺伝子の準同質遺伝子系統の解析でも報告されており、玄米のみならず籾殻も小さくなるのがその一つの原因と考えられている (Ohsumi ら 2011, Fukushima ら 2017)。本研究では系統 A の籾殻の大きさを定量評価していないが、既報の準同質遺伝子系統の解析と同様の現象が起きている可能性が考えられる。この粒数と籾殻の大きさのトレードオフの関係は生理学的にも遺伝学的にも未解明な部分が多く、水稻の多収化を目指す上での今後の課題と言える。一方、系統 B では「北陸 193 号」と同程度の全粒数を維持したまま、精玄米千粒重が有意に大きくなったため、シンク容量は拡大した。しかし、登熟歩合は「北陸 193 号」より低くなり、結果として収量に有意差は認められなかった。穂へ供給可能な炭水化物の総量 (穂揃期の NSC 含有量と登熟期の乾物増加量の和) は、「北陸 193 号」ではシンク容量を上回っていたのに対し、系統 B はシンク容量に対してほぼ等しいか下回っていた (第 3 図)。以上から、系統 B はシンク容量に対して相対的に NSC 蓄積や乾物生産量が少なく、このことが「北陸 193 号」と比較して登熟歩合が低下した原因と考えられた。従って、「北陸 193 号」を超える収量を得るためには、乾物生産能力を維持したままシンク容量を拡大する必要があるものと考えられた。系統 B は「北陸 193 号」の収量を超えることはなかったものの、同程度の収量性を維持したまま、登熟期の低温回避等早生化による利点があるため、長野県のような比較的冷涼な地域では飼料用米の安定生産と普及拡大に有望な系統と言える。今後は早生系統の乾物生産能力の維持や向上に関して栽植密度を高める、または 1 株苗本数を増やすといった栽培法との組み合わせによる検証を進めるとともに、他地域との比較の中で「北陸 193 号」の高いソース能のメカニズムを生理生態面から解析する予定である。

謝辞：本論文の作成にあたり、長野県農業試験場の酒井長雄氏に有益な助言をいただいた。ここに記してお礼申し上げる。

引用文献

Fukushima, A., Ohta, H., Yokogami, N., Tsuda, N., Yoshida, A., Kyojuka,

- J., and Maekawa, M. 2017. Effects of genes increasing the number of spikelets per panicle, TAW1 and APO1, on yield and yield-related traits in rice. *Plant Prod. Sci.* 20: 485-489.
- Goto, A., Sasahara, H., Shigemune, A. and Miura, K. 2009. Hokuriku 193: A new high-yielding Indica rice cultivar bred in Japan. *JARQ* 43: 13-18.
- 平林秀介・根本博・安東郁男・加藤浩・太田久稔・佐藤宏之・竹内善信・石井卓朗・前田英郎・井邊時雄・出田収・平山正賢・岡本正弘・西村実・八木忠之・梶亮太 2010. 飼料用水稲品種「モミロマン」の育成. *作物研報* 11: 31-47.
- Horie, T., Ohnishi, M., Angus, J. F., Lewin, L. G., Tsukaguchi, T. and Matano, T. 1997. Physiological characteristics of high-yielding rice inferred from cross-location experiments. *Field Crops Res.* 52: 55-67.
- 井邊時雄・赤間芳洋・中根晃・羽田丈夫・伊勢一男・安東郁男・内山田博士・中川宣興・古舘宏・堀末登・能登正司・藤田米一・木村健治・森宏一・高柳謙治・上原泰樹・石坂昇助・中川原捷洋・山田利昭・古賀義昭 2004. 多用途向き多収水稻品種「タカナリ」. *作物研報* 5: 35-51.
- 楠谷彰人・上田一好・浅沼興一郎・豊田正範 1999. 水稻における多収性の品種生態に関する研究：ソース・シンク比と収量との関係. *日作紀* 68: 21-28.
- Morita, S. and Nakano, H. 2011. Nonstructural Carbohydrate content in the stem at full heading contributes to high performance of ripening in heat-tolerant rice cultivar nikomaru. *Crop Sci.* 51: 818-828.
- 長田健二・佐々木良治・大平陽一 2012. 中国地域における多収水稻の品種特性及び収量ポテンシャル. *日本作物学会第 233 回講演会要旨集*: 424-425.
- 長田健二・大角壮弘・吉永悟志・中野洋 2016. 水稻多収品種における登熟期気象条件と収量との関係の品種間差. *日作紀* 85: 367-372.
- Ohsumi, A., Takai, T., Ida, M., Yamamoto, T., Arai-Sanoh, Y., Yano, M., and Kondo, T. 2011. Evaluation of yield performance in rice near-isogenic lines with increased spikelet number. *Field Crops Res.* 120: 68-75.
- Okamura, M., Hashida, Y., Hirose, T., Ohsugi, R. and Aoki, N. 2016. A simple method for squeezing juice from rice stems and its use in the high-throughput analysis of sugar content in rice stems. *Plant Prod. Sci.* 19: 309-314.
- Okamura, M., Hosoi, J., Nagata, K., Koba, K., Sugiura, D., Arai-Sanoh, Y., Kobayashi, N. and Kondo, M. 2022. Cross-locational experiments to reveal yield potential and yield-determining factors of the rice cultivar 'Hokuriku 193' and climatic factors to achieve high brown rice yield over 1.2 kg m⁻² at Nagano in central inland of Japan. *Plant Prod. Sci.* 25: 131-147.
- R Core Team 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (2021 年 9 月 16 日閲覧).
- 酒井長雄・青木政晴・土屋学 2011. 子実用水稲多収品種の収量性と立毛乾燥を前提とした耐倒伏性. *北陸作報* 46: 23-26.
- 酒井長雄・細野哲・吉永悟志・青木政晴・土屋学 2015. 多収性品種「北陸 193 号」の登熟特性と収量性. *北陸作報* 51 (別): 11.
- Yagioka, A., Hayashi, S., Kimiwa, K. and Kondo, M. 2021. Sink production and grain-filling ability of a new high-yielding rice variety, Kitagenki. *Field Crops Res.* 260: 107991.

Characteristics of Dry Matter Production and Yield Components of a High-Yielding Rice Cultivar 'Hokuriku 193' and Its Progeny Lines in Nagano, Japan : Jun Hosoi¹⁾, Masaki OKAMURA²⁾, Kenji NAGATA³⁾, Nobuya KOBAYASHI⁴⁾, Motohiko KONDO⁵⁾, Akira KOMATSU⁶⁾, Koji NAKAGOMI⁷⁾ and Hideo MAEDA⁷⁾ (¹⁾Nagano Prefecture Agricultural Experiment Station, Suzaka 382-0072, Japan; ²⁾Central Region Agricultural Research Center, NARO; ³⁾Western Region Agricultural Research Center, NARO; ⁴⁾Institute of Crop Science, NARO; ⁵⁾Nagoya University; ⁶⁾Institute of Agrobiological Sciences, NARO; ⁷⁾Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council, MAFF)

Abstract : Field experiments using a high-yielding rice cultivar 'Hokuriku 193' and two progeny lines were conducted across three years in Nagano Prefecture, the highest-yielding area for rice in Japan. The characteristics of growth, dry matter production, yield and yield components were compared at the high yielding level of over 1200 g m⁻² for rough brown rice. The two progeny lines of 'Hokuriku 193' showed lower shoot dry weight than 'Hokuriku 193' owing to growth duration shortened by early heading. The abundance of available carbohydrate for grain filling represented by the sum of stem non-structural carbohydrate at full heading and dry matter increase during grain filling tended to be lower in the two progeny lines. The total grain number was higher in line A than in 'Hokuriku 193' while the thousand grain weight was lighter. The sink capacity represented by the product of grain number and weight were similar or slightly smaller. The ratio of filled grain was similar to that of 'Hokuriku 193' or slightly lower. The brown rice yield of line A was lower than 'Hokuriku 193'. On the other hand, the sink capacity of line B was improved by a heavier thousand grain weight with similar grain number. The ratio of filled grain was lower. As a result, brown rice yield of line B was similar to that of 'Hokuriku 193' despite shorter growth duration. Given that earlier heading can avoid low temperature during grain filling, line B is a promising line for Nagano prefecture.

Key words : Breeding of rice cultivar, High yield rice, Nagano Prefecture, Sink capacity.