高温による内部褐変症に強い‘だいこん中間母本農6号’の育成経過とその特性

小原隆由^{1*}・岡田英孝²・柿崎智博¹・石田正彦^{1a}・吹野伸子¹・板橋悦子¹・伊藤智司^{2b}

¹ 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構野菜花き研究部門 514-2392 三重県津市安濃町草生

² 横浜植木株式会社菊川研究農場 439-0031 静岡県菊川市加茂

Breeding of Radish (*Raphanus sativus* L.) Parental Line ‘Daikon Chukanbohon No 6 Go’ with High Tolerance to Internal Browning Caused by High Temperatures

Takayoshi Ohara^{1*}, Hidetaka Okada², Tomohiro Kakizaki¹, Masahiko Ishida^{1a},
Nobuko Fukino¹, Etsuko Itabashi¹ and Satoshi Ito^{2b}

¹ Institute of Vegetable and Floriculture Science, NARO, Kusawa, Ano, Tsu, Mie 514-2392

² The Yokohama Nursery Co., Ltd, Kikugawa Research Station, Kamo, Kikugawa, Shizuoka 439-0031

Abstract

In Japanese radish, internal browning is a physiological disorder caused by exposure to high temperatures. Due to the increase in global warming, it is feared that damage caused by this disorder will severely affect the stable summer production of the Japanese radish. We evaluated the tolerance to internal browning in 294 accessions of Japanese and other radishes. A local variety from Okinawa Prefecture, ‘Shimadaikon,’ was selected as the breeding material. As a result of repeated selections of progenies derived from the cross between ‘Shimadaikon’ and fixed line 10P13 under high-temperature conditions, we developed ‘Daikon chukanbohon No 6 go’, a Japanese radish parental line with a high tolerance to internal browning. ‘Daikon chukanbohon No 6 go’ showed stable tolerance to internal browning in eight test sites including Tsu, which has a high summer temperature. Several genes were involved in the tolerance to internal browning in this variety, and the tolerance was expressed as incompletely dominant in the F₁ generation. In the F₂ generation, a relatively large number of individuals showed the same tolerance level as ‘Daikon chukanbohon No 6 go’.

Key Words : climate warming, genetic resources, heat tolerance, physiological disorder

キーワード : 遺伝資源, 気候温暖化, 高温耐性, 生理障害

1. 育成の背景

夏期のダイコン栽培においてしばしば発生する内部褐変症は、肥大根の中心部が赤～黒褐色に変色する生理障害で、生産現場では赤しん症とも呼ばれている。障害が発生した部分は木部柔細胞が崩壊してポリフェノール化合物が蓄積し (Fukuoka・Enomoto, 2001), 組織は硬く苦味や辛みがある (川合ら, 1992; 川城・武田, 1988)。本障害の発生の有無は収穫物の外観からでは判別できないため、出荷時に検査で見えれば圃場単位で廃棄せざるを得ない場合もある。夏ダイコンの主産地は北海道や青森県などの冷涼な地域であるが、近年はこれらの地域でも被害が多発する場合があります。周年安定供給が求められるダイコン生産にお

ける重要課題となっている。

内部褐変症の原因がホウ素欠乏によることはよく知られているが (林・石居, 1968; 門野ら, 1961; 川合ら, 1993), 1980年代に夏ダイコン産地での被害が問題となったことから高温との関係が調査された。その結果、根が旺盛に肥大する生育後半の気温や地温と内部褐変症の発生には高い相関があり、最高気温が30°C、あるいは平均気温が25°C以上の高温になると発生割合が高まることが明らかにされた (Fukuoka・Kano, 1990; 川合ら, 1992; 川城・武田, 1988)。Fukuoka・Enomoto (2001) は、生育後期に高温ストレスに遭遇すると、根身内部に消去しきれない活性酸素種が蓄積され、それにより細胞が損傷・崩壊してポリフェノール化合物が蓄積することを示している。

内部褐変症の発生程度には明瞭な品種間差が認められる (Fukuokaら, 2010; 川城・武田, 1988)。夏ダイコンの産地では本障害が発生しにくいとされる品種が利用されているが、前述のとおり気象条件によっては大きな被害が生じる場合がある。地球温暖化予測情報 (気象庁, 2017) によると、我が国の年平均気温は、今世紀末には全国平均で4.5°C上昇すると予測されている。そのような環境下では、

2020年9月1日 受付。2020年10月19日 受理。

本研究の一部は、戦略的プロジェクト研究推進事業「農業分野における気候変動適応技術の開発 A-10 系 温暖化の進行に適応する品種・育種素材の開発 (BGW4102)」の助成を受けて実施し、園芸学会平成24年度春季大会および平成29年度春季大会で発表した。

* Corresponding author. E-mail: oharatakayoshi1027@gmail.com

^a 現在: 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構本部

^b 現在: 横浜植木株式会社本社

内部褐変症の発生しにくい品種であっても栽培は困難となり、夏期の国産ダイコンの安定供給は難しくなる可能性がある。将来にわたりダイコンの周年安定供給を図るためには、本障害により強い耐性を有する品種の育成が求められる。

そこで、著者らは、温暖化がさらに進行しても栽培可能なダイコンの開発に取り組んだ結果、強度の内部褐変症耐性を有する育種素材品種‘だいこん中間母本農6号’を育成したので、その育成の経過と品種特性を報告する。

2. 育成経過

1) 内部褐変症耐性遺伝資源の検索

内部褐変症に強い耐性を示す育種素材を広く検索するため、国内および海外から導入した294点のダイコン遺伝資源を供試し、2010年7月5日、7月25日、2011年6月28日および7月12日の4回に分け、それぞれ119点、75点、62点、38点を三重県津市の露地圃場で栽培した。対照品種

には、夏ダイコンとして栽培の多い市販のF₁品種‘夏つかさ旬’、‘貴宮’などを用いた。栽植密度は株間30cm、畝幅60cmとし、反復は設けず、各5～6個体を調査した。各個体の症状を5段階の評点（0：無発生、1：やや水浸状、2：水浸状程度が甚、3：一部褐変、4：褐変が甚）で評価し、内部褐変症発生程度（ Σ （評点×株数）／（最大評点×全株数）×100）を算出した。

調査の結果、供試した遺伝資源の多くは激しい内部褐変症状を示し、全遺伝資源の内部褐変症発生程度の値は平均69（最大100）であった。第1表に内部褐変症発生程度の低かった遺伝資源を示す。遺伝資源を主に藤枝（1989）に従って品種群に分類した場合、二年子群、練馬群、沖縄在来、中国（華北）、南九州地大根、中国（華南）などの中に、内部褐変症発生程度が低い遺伝資源が比較的多く含まれていた。有望な遺伝資源について翌年に2回の評価を実施した結果、沖縄在来の‘シマダイコン’の内部褐変症発生

第1表 内部褐変症発生程度の低いダイコン遺伝資源

播種日 品種	JP 番号 ^z	品種群	内部褐変症 発生程度 ^y	根長 (cm)	根重 (g)
2010年7月5日					
二年子大根（中早生）	27114	二年子	10	19	171
五香二年子	27064	二年子	25	28	393
早太り白夏大根	27014	二年子	29	27	247
耐病性秋づまり	27121	練馬	42	16	208
二年子	26975	二年子	44	34	378
高倉	26950	練馬	44	39	442
夏つかさ旬		宮重	92	33	1,094
貴宮		宮重	100	33	632
2010年7月25日					
シマダイコン	138085	沖縄在来	21	17	365
章溪水柳水夢ト	43245	中国（華北）	29	29	722
夏つかさ旬		宮重	33	33	901
貴宮		宮重	92	40	1,377
2011年6月28日					
圓頭蘿蔔	133743	中国（華南）	25	12	498
新時なし大根	27136	二年子	33	26	265
二年子太根（早生）	27116	二年子	35	21	239
赤ダイコン	27254	南九州地大根	38	14	226
浙大長	133697	中国（華南）	44	33	781
夏つかさ旬		宮重	75	30	794
貴宮		宮重	95	38	871
2011年7月12日					
地でこん（昔でこん）	236519	南九州地大根	25	24	261
開聞岳大根	236515	南九州地大根	45	21	249
地でこん（池田在来としま大根）	236520	南九州地大根	45	20	246
夏つかさ旬		宮重	60	28	651
貴宮		宮重	70	32	798

^z 農業生物資源ジーンバンクにおけるID番号

^y 5段階の評点（0：無発生、1：やや水浸状、2：水浸状程度が甚、3：一部褐変、4：褐変が甚）で評価し、内部褐変症発生程度（ Σ （評点×株数）／（最大評点×全株数9×100））を算出

程度の値 (30, 45) が ‘夏つかさ旬’ の値 (75, 60) に比べ安定して低かったことから、これを育種素材として選定し、内部褐変症耐性品種の育成を開始した。

2) 系統選抜

‘シマダイコン’ は丸～腰高の根形で根長が短い上、遺伝的固定度が低く、根形や大きさのばらつきが大きい。そこで、育種素材としてより利用しやすい固定系統に改良するため、2011年に横浜植木(株)育成の固定系統 10P13 と ‘シマダイコン’ を交配した。その後、夏期高温となる津市および静岡県菊川市、夏ダイコンの産地である長野県茅野市、北海道北広島市で内部褐変症の発生程度を評価して後代の選抜固定を進めた。その結果、2016年に、内部褐変症の発生程度が安定して低く、‘シマダイコン’ に比べ実用品種に近い固定系統 (F_7 世代) を選抜し、ダイコン安菊1号の系統名を付した。2017年および2018年に育成地で栽培試験を行った他、夏ダイコンの産地が存在する4県の試験研究機関において特性評価試験を実施したところ、ダイコン安菊1号は強度の内部褐変症耐性を安定して示すことが確認された。また、ダイコン安菊1号の育成途中系統 (F_5 世代) と内部褐変症に弱い自殖系統を交配した後代を用いて内部褐変症耐性の遺伝性を調査した結果、耐性は複数の遺伝子に支配される形質であり、後代からダイコン安菊1号と同程度の耐性系統の選抜が可能であることが明らかになった。これらのことから、ダイコン安菊1号は内部褐変症耐性の育種素材として有用であると判断し、2020年に ‘だいこん中間母本農6号’ (以下 ‘農6号’ とする) として品種登録出願した (品種登録出願番号第34469号, 2020年1月23日)。

3. 品種の特性

‘農6号’ の特性を明らかにするため、育成地 (津市、

菊川市、茅野市、北広島市) および夏ダイコン産地が存在する4県 (群馬県、新潟県、長野県、岡山県) の公立試験研究機関において栽培試験を行った。

1) ‘農6号’ の育成地における評価

試験の概要を第2表に示す。

(1) 内部褐変症の耐性の評価

内部褐変症耐性の評価は、2017および2018年度に、津市、菊川市、茅野市、北広島市の露地圃場において、初夏まき夏どりの作型で実施した。対照品種として、最も内部褐変症耐性の強い夏用市販 F_1 品種の一つである ‘夏つかさ旬’、ならびに内部褐変症が発生しやすい秋冬用 F_1 品種 ‘福天下’ を用いた。

津市においては、対照品種の根部には激しい内部褐変症が発生し、内部褐変症発生程度の値は ‘夏つかさ旬’ が 70～85, ‘福天下’ が 94～99 と高かった (第3表, 第1図)。これに対し、‘農6号’ では内部褐変症の発生がほとんど認められず、発生程度の値は 0～8 と極めて低かった。また、菊川市での栽培では、‘夏つかさ旬’ の発生程度の値が 58～80, ‘福天下’ が 93～96 であったのに対し、‘農6号’ は 0～27 と低く抑えられた。夏ダイコン産地である茅野市と北広島市においても、‘夏つかさ旬’ の発生程度の値は 31～50, ‘福天下’ では 35～100 となったのに対し、‘農6号’ は 0～10 と低かった。以上のことから、‘農6号’ は、市販の F_1 品種と比較して強い内部褐変症耐性を有しており、その耐性は幅広い地域で安定して発揮されるものと考えられた。

(2) 一般特性の評価

2017および2018年に、初夏まき夏どり栽培における収穫物の特性を調査した。試験地、対照品種および栽培方法は (1) と同様である。また、同じく 2017～2018年に、津

第2表 育成場所における内部褐変症ならびに一般特性評価試験の耕種概要

年次	試験地	播種日	収穫日	栽植様式	株間×畝幅 (cm)	栽植密度 (株／10 a)	試験規模	
内部褐変症耐性および一般特性評価（初夏まき夏どり栽培）								
2017	津市	6月23日	8月21日	1条無マルチ	30×60	5,500	20株×2反復	
	菊川市	7月18日	9月19日	2条シルバーマルチ	23×60	7,200	20株×2反復	
	茅野市	6月24日	8月16日	2条シルバーマルチ	27×60	6,000	20株×2反復	
	北広島市	6月28日	8月24日	1条無マルチ	22×60	7,400	20株×2反復	
2018	津市	6月27日	8月30日	1条無マルチ	30×60	5,500	20株×2反復	
	菊川市	7月18日	9月10日	2条シルバーマルチ	23×60	7,200	20株×1反復	
	茅野市	6月24日	8月20日	2条シルバーマルチ	27×60	6,000	20株×2反復	
	北広島市	6月28日	8月27日	1条無マルチ	22×60	7,400	20株×2反復	
一般特性評価（秋まき冬どり栽培）								
2017	津市	9月11日	12月 4日	1条無マルチ	30×60	5,500	20株×3反復	
2018	津市	9月18日	12月17日	1条無マルチ	30×60	5,500	20株×3反復	
内部褐変症耐性遺伝解析							親・F ₁	F ₂
2016	津市（ハウス）	6月 1日	7月28日	2条白黒マルチ	28×80	4,400	8株×2反復	184株
	津市（露地）	6月27日	8月23日	1条無マルチ	30×60	5,500	10株×2反復	297株
	菊川市（露地）	7月 6日	9月 7日	2条シルバーマルチ	23×60	7,200	10株×2反復	166株

第3表 ‘だいこん中間母本農6号’ の内部褐変症発生程度

年次	品種	備考	内部褐変症発生程度 ^z			
			津市	菊川市	茅野市	北広島市
2017	農6号		0 a ^y	27 a	10 a	0 a
	夏つかさ旬	対照・耐性强	85 b	80 b	50 b	41 b
	福天下	対照・耐性弱	94 c	96 c	100 c	35 b
2018	農6号		8 a	0	9 a	0 a
	夏つかさ旬	対照・耐性强	70 b	58	31 a	50 c
	福天下	対照・耐性弱	99 c	93	63 b	40 b

^z 第1表に同じ^y 各年次の各試験地において、異なるアルファベット間にはRyanの多重比較により5%水準で有意差あり、2018年の菊川市の試験は無反復のため統計処理なし 第1図 初夏まき夏どり栽培における‘だいこん中間母本農6号’の根部断面
2017年8月21日撮影，左：‘だいこん中間母本農6号’，右：‘夏つかさ旬’

市の露地圃場において、秋まき冬どり栽培における収穫物の特性調査を行った。対照品種には、‘夏つかさ旬’を用いた。

初夏まき夏どり栽培における収穫物の特性を第4表に示す。葉長、根長および最大部根径の値は対照品種の‘夏つかさ旬’に比べ小さかった。また、全重、根重は‘夏つかさ旬’の概ね半分以下と小さかった。空洞症の発生は‘夏つかさ旬’と同程度かやや多い傾向が見られたが、その程度は小さく、実用上問題となるものではなかった。す入りはすべての場所と年次で発生が見られなかった。秋まき冬どり栽培における‘農6号’の収穫物の特性を第5表に示す。初夏まき夏どり栽培と同様、葉長、根長および最大部根径の値は対照品種に比べて小さく、全重および根重は‘夏つかさ旬’の5～6割程度と小さくなった。空洞やすりなどの障害発生は認められなかった。‘農6号’の根形は“先流れ”（中央部から先端にかけ徐々に細くなる形状）で、‘夏つかさ旬’に比べ葉色はやや濃く、根色の補充色（首部の着色程度）は淡かった（第2図）。

(3) 内部褐変症耐性の遺伝性の検討

‘農6号’の内部褐変症耐性の遺伝性を明らかにするため、2016年に、津市のビニルハウスおよび露地圃場、菊川市の露地圃場の3か所で遺伝解析試験を実施した。材料

には、‘農6号’の育成途中系統（F₅世代）で強い内部褐変症耐性を示す11P13SD 茅-59 菊-5（P₁）、内部褐変症に弱い自殖系統FT-18（P₂）、ならびにP₁とP₂を交配して作成したF₁、F₂を用いた。

3地点におけるP₁の内部褐変症発生程度の値は0～15、P₂ではすべて100であった（第6表）。F₁の値は3地点とも両親の間に位置し、P₂側に近い値（79～83）を示した。F₂集団の平均値は41～64で、両親の中間程度であった。F₂集団における内部褐変症評点の個体分布を第3図に示す。3地点でそれぞれ分布の形状が異なっていたものの、いずれも評点0～4の個体が連続的に分布した。以上のことから、内部褐変症耐性はF₁において不完全優性に発現すること、また、耐性には複数の遺伝子が関与していることが示唆された。なお、津市のハウスおよび露地の結果では、内部褐変症発生程度と根重の間に弱い正の相関（それぞれ $r=0.32^{**}$ 、 0.34^{**} 、 ** は1%水準で有意）が認められた。それ以外の不良形質と内部褐変症耐性との関係は特に認められていない。

2) ‘農6号’の公立試験研究機関における特性評価

(1) 評価地の耕種概要

2017および2018年度に、群馬県農業技術センター（伊勢崎市）、新潟県農業総合研究所園芸研究センター（北蒲

第4表 初夏まき夏どり栽培における‘だいこん中間母本農6号’の収穫物の特性

年次	試験地	品種	葉長 (cm)	根長 (cm)	最大部根径 (mm)	全重 (g)	根重 (g)	障害発生程度 ^z	
								空洞	す入り
2017	津市	農6号	26 a ^y	27 a	54 a	644 a	454 a	5 a	0 a
		夏つかさ旬	34 b	37 b	72 b	1,442 c	1,132 c	0 a	25 a
		福天下	28 a	38 b	60 a	1,013 b	830 b	27 a	78 b
	菊川市	農6号	39 a	26 a	63 a	948 a	569 a	10 a	0 a
		夏つかさ旬	43 a	37 b	77 a	1,851 b	1,292 b	3 a	18 b
		福天下	44 a	39 b	69 a	1,667 b	1,124 b	15 a	27 b
	茅野市	農6号	34 a	32 a	61 a	1,007 a	656 a	5 a	0 a
		夏つかさ旬	41 a	38 b	73 a	1,641 c	1,193 c	0 a	0 a
		福天下	40 a	38 b	69 a	1,521 b	1,136 b	0 a	57 b
	北広島市	農6号	33 a	27 a	67 a	964 a	733 a	2 a	0
		夏つかさ旬	48 b	36 b	81 b	1,932 b	1,510 b	2 a	0
		福天下	39 ab	38 b	75 ab	1,739 b	1,408 b	2 a	0
2018	津市	農6号	27 a	27 a	60 a	574 a	427 a	23 a	0 a
		夏つかさ旬	36 a	37 ab	78 b	1,688 b	1,320 b	0 a	40 b
		福天下	32 a	36 b	62 a	1,066 ab	827 ab	15 a	52 c
	菊川市	農6号	36	20	49	557	243	0	0
		夏つかさ旬	41	30	72	1,396	783	7	3
		福天下	36	28	56	861	472	7	0
	茅野市	農6号	27 a	28 a	59 a	683 a	497 a	7 a	0 a
		夏つかさ旬	31 a	37 b	67 b	1,200 a	959 b	2 a	13 a
		福天下	23 a	39 b	61 a	1,048 a	890 b	0 a	55 b
	北広島市	農6号	33 a	28 a	59 a	645 a	488 a	2 a	0 a
		夏つかさ旬	46 a	42 b	69 a	1,516 a	1,166 a	1 a	2 a
		福天下	42 a	40 b	63 a	1,190 a	938 a	0 a	8 b

^z 各株の障害発生程度を0：無発生～3：甚の4段階に階級値化し、次式により算出 $\Sigma(\text{階級値} \times \text{株数}) / (\text{最大階級値} \times \text{全株数}) \times 100$

^y 各試験の各項目において、異なるアルファベット間にはRyanの多重比較により5%水準で有意差あり、2018年の菊川市の試験は無反復のため統計処理なし

第5表 秋まき冬どり栽培における‘だいこん中間母本農6号’の収穫物の特性

年次	品種	葉長 (cm)	根長 (cm)	最大部根径 (mm)	全重 (g)	根重 (g)	T/R率 ^z (%)	障害発生程度 ^y	
								空洞	す入り
2017	農6号	33	29	73	1,126	923	22	0	0
	夏つかさ旬	37	36	80	1,881	1,528	23	0	4
	有意性 ^x	*	**	ns	**	**	ns	—	ns
2018	農6号	36	31	75	1,225	963	27	0	0
	夏つかさ旬	44	43	88	2,469	1,993	24	0	0
	有意性	*	**	**	**	**	*	—	—

^z $((\text{全重} - \text{根重}) / \text{根重}) \times 100$

^y 各株の障害発生程度を0：無発生～3：甚の4段階に階級値化し、次式により算出 $\Sigma(\text{階級値} \times \text{株数}) / (\text{最大階級値} \times \text{全株数}) \times 100$

^x t検定により**は1%、*は5%水準で品種間に有意差あり、nsは有意差なし

原郡聖籠町)、長野県野菜花き試験場(塩尻市)および岡山県農林水産総合センター農業研究所高冷地研究室(真庭市)の露地圃場において特性評価試験を実施した。試験の概要を第7表に示す。対照品種として‘夏つかさ旬’と‘福

天下’を用い、各試験地で実際に内部褐変症が問題になりやすい初夏まき夏どり、または夏まき秋どり作型で栽培した。

第2図 秋まき冬どり栽培における‘だいこん中間母本農6号’の収穫物
2017年12月4日撮影

(2) 内部褐変症の耐性の評価

長野県の2017年、新潟県の2018年の試験では、内部褐変症に弱い対照品種‘福天下’においても発生程度が低かったことから、本障害の発生しにくい環境条件であったと考えられた(第8表)。その他の場所・年次における試験では‘福天下’は48~100と高い発生程度を示したこと

から、耐性の評価に適した条件であったと考えられ、そのような条件下で‘農6号’は内部褐変症がほとんど発生せず、発生程度の値は0~15と低かった。‘夏つかさ旬’の発生程度の値は新潟県と長野県では低かったが、群馬県および岡山県では高い値(23~60)となった。

(3) 一般特性の評価

‘農6号’の収穫物の特性は、対照品種に比べ根長、根重が小さく、収量性は劣っていた(第8表)。空洞、す入りの発生については、2017年の長野県で空洞症が多発した以外は、対照品種と同等か、少なかった。裂根および軟腐病の発生は、対照品種と同等か、年によってはやや多い場合が見られた。黒斑細菌病抵抗性は対照品種と同等であり問題なかった。

4. 考 察

気象庁(2017)によると、夏ダイコンの主産地である北日本においても、夏の平均気温(6~8月)は今世紀末までに4.5°C上昇すると予測されている。現在、北海道の8月の平均気温平年値は22.3°C(札幌市)、青森県は23.3°C(青森市)であるが、将来は27°Cを超える気温になることが懸念される。内部褐変症の発生は平均気温と高い相関があること(川合ら, 1992)、近年は高温に強い夏ダイコン品種を利用しても被害が頻発していることを考えると、今後の夏ダイコンの安定生産のためには、より強度の内部褐変症耐性を有する品種の育成が必須となると考えられる。

本研究では、まず、内部褐変症に強い遺伝資源を検索するため、8月の平均気温平年値が27.5°Cと高い津市におい

第6表 11P13SD 茅-59 菊-5とFT-18のF₁およびF₂集団における内部褐変症発生程度の差異

系統・世代	試験地	津市（ハウス）		津市（露地）		菊川市（露地）	
	調査 個体数	内部褐変症 発生程度 ^z	調査 個体数	内部褐変症 発生程度	調査 個体数	内部褐変症 発生程度	
11P13SD 茅-59 菊-5 ^y （P1）	16	3	12	15	11	0	
FT-18（P2）	14	100	12	100	15	100	
F ₁ （P1×P2）	16	83	12	79	11	83	
F ₂ （P1×P2）	184	41	297	64	166	54	

^z 第1表に同じ

^y ‘だいこん中間母本農6号’の育成途中系統 (F₅ 世代)

第3図 11P13SD 茅-59 菊-5 (‘だいこん中間母本農6号’のF₅ 世代)とFT-18のF₂ 集団における内部褐変症評点の頻度分布
A: 津市 (ハウス) (n=184), B: 津市 (露地) (n=297), C: 菊川市 (露地) (n=166)

第7表 公立試験研究機関における特性評価試験の耕種概要

検定場所	年次	播種日	収穫日	栽植様式	畝間×株間 (cm)	栽植密度 (株/10a)	試験規模
群馬県農業技術センター	2017	6月23日	8月17日	2条白黒マルチ	57.5×27	6,440	20株×3反復
	2018	7月8日	9月6日	2条白黒マルチ	57.5×28	6,440	20株×3反復
新潟農総研園芸研究センター	2017	8月1日	9月25日	1条無マルチ	60×30	5,500	15株×3反復
	2018	8月1日	10月2日	1条無マルチ	60×31	5,500	18株×3反復
長野県野菜花き試験場	2017	7月7日	8月29日	1条白黒マルチ	60×32	5,555	20株×3反復
	2018	6月25日	8月16日	2条白黒マルチ	60×33	5,555	20株×3反復
岡山県農水総セ高冷地研究室	2017	6月20日	8月16日	2条シルバーマルチ	70×24	5,952	20株×3反復
	2018	6月22日	8月27日	2条シルバーマルチ	70×25	5,952	20株×2反復

第8表 公立試験研究機関における内部褐変症発生程度ならびに一般特性

検定場所	年次	品種	内部褐変症 発生程度 ^z	収穫物特性								発生程度		
				葉長 (cm)	根長 (cm)	根径 (mm)	全重 (g)	根重 (g)	収量 ^y (t/10a)	障害発生程度 ^x		裂根	軟腐病	黒斑 細菌病
										空洞	す入り			
群馬県農業技術 センター	2017	農6号	7	25	19	31	194	88	0.6	0	0	無	甚	微
		夏つかさ旬	36	40	28	58	858	558	3.6	0	0	微	中	微
		福天下	64	33	25	52	488	347	2.2	0	10	中	甚	微
	2018	農6号	8	34	22	44	398	202	1.3	0	0	—	無	微
		夏つかさ旬	60	47	37	69	1,334	933	6.0	0	0	—	無	微
		福天下	73	43	36	58	918	607	3.9	10	0	—	無	微
新潟農総研園芸 研究センター	2017	農6号	5	31	28	52	582	408	1.8	0	0	無	微	微
		夏つかさ旬	3	42	35	65	1,229	824	4.1	0	0	無	無	微
		福天下	48	33	33	55	921	687	2.8	7	27	無	無	無
	2018	農6号	0	27	26	56	510	386	1.6	0	0	無	無	微
		夏つかさ旬	0	33	30	66	954	757	3.2	0	13	無	微	微
		福天下	10	38	36	65	1,269	996	4.1	12	0	無	無	微
長野県野菜花き 試験場	2017	農6号	0	28	25	39	430	279	1.5	30	0	中	中	—
		夏つかさ旬	0	43	41	66	1,549	1,273	7.1	13	33	無	微	—
		福天下	5	38	37	61	1,257	994	5.5	37	70	中	少	—
	2018	農6号	0	25	24	51	513	339	1.9	0	13	—	—	—
		夏つかさ旬	3	40	39	71	1,691	1,175	6.5	3	3	—	—	—
		福天下	75	37	38	65	1,335	938	5.2	7	10	—	—	—
岡山県農水総セ 高冷地研究室	2017	農6号	15	32	29	53	693	508	3.0	3	0	甚	中	中
		夏つかさ旬	23	37	39	70	1,422	1,213	7.2	3	20	微	微	中
		福天下	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2018	農6号	3	23	29	50	508	389	2.3	0	3	無	無	微
		夏つかさ旬	38	30	37	62	887	762	4.5	0	93	無	無	微
		福天下	93	21	35	54	660	571	3.4	3	97	無	無	微

^z 第1表に同じ^y 根重×10a当たり栽植本数から推計^x 各株の障害発生程度を0: 無発生～3: 甚の4段階に階級値化し、次式により算出 Σ (階級値×株数) / (最大階級値×全株数) × 100, ハイフン (—) は未調査を示す

て、幅広い品種群に属するダイコン遺伝資源を栽培した。試験実施時の気象は、夏ダイコン用の市販F₁品種においても激しい内部褐変症状が現れる厳しい条件であり、供試した遺伝資源の多くには病害や内部褐変症が多発した。一般に、みの早生群の品種は耐暑性が強いとされるが（熊沢・秋谷, 1965）、今回の試験では内部褐変症に特に強い遺伝資源は認められなかった。一方、耐性が強いと評価さ

れた遺伝資源は二年子群、沖縄在来、南九州地大根、中国（華北）などの品種群の中に存在したことから、今後新たな耐性育種素材を検索する際には、これらの品種群を優先して調査することが有効と思われる。ただし、内部褐変症耐性が特に強い品種が多かった二年子群については、極めて晩抽性が強く、肉質が粗剛で硬いこと（熊沢・秋谷, 1965）から、育種素材としては利用しにくい。一方、‘シ

マダイコン’は、内部褐変症耐性が強く、肉質は緻密で優れていたことから、育種素材として有望と考えられる。

‘シマダイコン’と実用固定系統の交雑後代に由来する‘農6号’は、夏ダイコンの産地である北海道北広島市や長野県茅野市、また特性評価試験を実施した群馬県、新潟県、長野県および岡山県において、内部褐変症の発生がほとんど認められなかった。さらに、これらの地域に比べ気温が高い津市や菊川市においても内部褐変症発生程度が低く抑えられた。特に津市の試験では、収穫前4週間の平均気温は28.1～29.0℃であり、札幌市の8月の平均気温22.3℃、青森市の23.3℃に比べおよそ5～7℃以上も高かった。このことから、将来温暖化が進行し、北海道や青森で平均気温が4.5℃上昇した場合でも、‘農6号’は十分な内部褐変症耐性を発揮する可能性がある。なお、育成地および公立試験研究機関における一般特性の評価の結果、‘農6号’は市販F₁品種に比べ根長が7割程度、根重が5割以下と、伸長・肥大性が劣った。これは、本品種は固定の進んだ自殖系統（F₇世代）であり、自殖弱勢が現れた結果と考えられる。なお、‘農6号’を片親としたF₁では、組合せにより十分なヘテロシスが現れ、市販品種と同等の伸長・肥大が認められることを確認している（未発表）。

Fukuokaら（2010）は、内部褐変症耐性の品種間差には、根部の木部柔細胞の大きさが密接に関連し、本障害が発生しにくい品種の木部柔細胞は、発生しやすい品種に比べ小さいことを報告している。木部柔細胞が小さく高分子ペクチン含量が高い品種では、高温ストレス下で発生する活性酸素種害に対する細胞自体の抵抗性が強く、細胞崩壊が起きにくいと考えられている（Fukuokaら、2010）。我々は‘農6号’の育成途中系統（F₅世代）を2014年に秋まき冬どり作型で栽培し、木部柔細胞の大きさを観察したところ、‘夏つかさ旬’に比べ細胞の断面積が5分の1程度と極めて小さいことを確認した（未発表）。‘農6号’の内部褐変症耐性には、木部柔細胞が小さく、細胞の崩壊が起こりにくいことが関与していると推察される。なお、‘農6号’の食感、‘夏つかさ旬’に比べ肉質が硬く緻密な印象である。

遺伝解析試験におけるF₂の評価結果からは、内部褐変症耐性と根重の間に弱い正の相関が認められ、耐性の強い個体はやや肥大性が劣る傾向が認められた。これには、上述した木部柔細胞の大きさが影響している可能性も考えられる。しかし、F₂の中には内部褐変症発生程度が低く、根重が比較的大きい個体も認められている。実用品種育成にあたっては、F₁におけるヘテロシスも活用することで、内部褐変症耐性と肥大性を両立する系統の育成は可能と考えられ、今後、実際の育種において実証していく必要がある。

‘農6号’の内部褐変症耐性は不完全優性に遺伝することが確認された。F₂世代では‘農6号’と同程度の耐性を示す個体が比較的多く出現することから、耐性に関与して

いる遺伝子の数はそれほど多くないと推察され、耐性系統の選抜は比較的容易と考えられる。一方、耐性の弱い系統と‘農6号’とのF₁においては、弱い方の親系統に近い内部褐変症発生程度を示したことから、‘農6号’と同程度の耐性を有するF₁品種を育成する場合には、両親ともに耐性を持たせることが望ましい。‘農6号’を1回親とした戻し交雑育種により実用F₁品種の両親に内部褐変症耐性を導入する際には、マーカー利用選抜の活用が極めて有効であるため、‘農6号’の耐性と連鎖するDNAマーカーの開発が求められる。また、‘シマダイコン’以外の育種素材に由来する内部褐変症耐性の利用についても、今後検討する必要がある。

摘 要

ダイコン内部褐変症は高温が原因で発生する生理障害で、気候温暖化が進行する中、夏期のダイコン安定生産への影響が懸念されている。そこで、内部褐変症に強度の耐性を有するダイコン育種素材系統の育成に取り組んだ。国内外のダイコン遺伝資源294点から内部褐変症に強い遺伝資源を検索した結果、沖縄在来品種‘シマダイコン’を育種素材に選定し、実用形質に優れた固定系統10P13と交配した。後代を高温条件下で繰り返し選抜した結果、内部褐変症の発生程度が安定して低い系統を育成し、2019年に‘だいこん中間母本農6号’として品種登録出願した。‘農6号’は夏期に高温となる三重県津市を含む8か所の試験地で安定して強い内部褐変症耐性を示した。本品種の内部褐変症耐性には複数の遺伝子が関与し、F₁世代においては、耐性は不完全優性に発現した。F₂世代では‘農6号’と同程度の耐性を示す個体が比較的多く出現した。

謝 辞 公立試験研究機関における特性評価試験においては、群馬県農業技術センター、新潟県農業総合研究所園芸研究センター、長野県野菜花き試験場ならびに岡山県農林水産総合センター農業研究所高冷地研究室の担当者各位に多大なご協力を頂きました。厚く感謝申し上げます。

引用文献

- 藤枝國光. 1989. 品種生態と作型適応性—日本のダイコン品種の成立と栽培—. 農文協編. 野菜園芸大百科12. ダイコン・カブ・ニンジン・ゴボウ. 農文協. 東京.
- Fukuoka, N. and T. Enomoto. 2001. The occurrence of internal browning induced by high soil temperature and its physiological function in *Raphanus* root. *Plant Sci.* 161: 117–124.
- Fukuoka, N., Y. Ikeshita and T. Enomoto. 2010. Relationship between the occurrence of internal browning and size of xylem parenchymatous cells in roots of Japanese radish. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 79: 27–33.
- Fukuoka, N. and Y. Kano. 1990. Effect of durations of high soil temperature treatment on the occurrence of brown pith, “Akashin”, in Japanese radish cv. Natsu-Minowase. *Bull.*

Ishikawa Agr. Coll. 20: 23–30.

- 林 雄・石居企救男. 1968. そ菜の硼素欠乏と対策—主にダイコンについて—. 農業および園芸. 43: 829–832.
- 門野行男・上岡誉富・大森 豊・岩本利一・青木喜昭. 1961. ダイコンの生理障害とくに硼素欠乏について. 兵庫農試研報. 9: 40–44.
- 川合貴雄・飛川光治・藤沢敏寛. 1992. ダイコン肥大根の赤心症ならびにポリフェノール含量に及ぼす播種期, 地温ならびに寒冷しゃ被覆の影響. 園学雑. 61: 339–346.

- 川合貴雄・飛川光治・藤沢敏寛・小野芳郎・石橋英二. 1993. ダイコンの赤心症発生に及ぼすホウ素およびリン酸施用の影響. 園学雑. 62: 165–172.
- 川城英夫・武田英之. 1988. ダイコン赤しん症の発生要因に関する研究. 第1報. 温度及び品種と発症の関係. 千葉農試研報. 29: 63–70.
- 気象庁. 2017. 地球温暖化予測情報 第9巻. <<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol9/pdf/all.pdf>>.
- 熊沢三郎・秋谷良三. 1965. 大根. p.295–322. 熊沢三郎著. 総合蔬菜園芸各論. 養賢堂. 東京.