

桜島大根の品種育成およびその栽培方法に関する研究

田中 義弘

要 約

本研究では、鹿児島県の代表的な伝統野菜である桜島大根に注目し、品種改良に有用な遺伝様式を明らかにし、さらに得られた遺伝学的知見を基に F₁ 品種を育成した。併せて、安定採種に向けた F₁ 純度検定および空洞症発生を軽減するための栽培方法についても検討した。

まず、桜島大根の肥大根重、肥大根の形態および空洞症に関する遺伝学的知見を得るために片側ダイヤレル分析を行った。その結果、肥大根重は、広義の遺伝率が高く、かつ狭義の遺伝率が低く、超優性の形質であると推定された。一方、空洞症の大きさを示す空洞面積率は、完全優性に近い不完全優性の形質と推定された。また、肥大根の形態に関して画像解析ソフト SHAPE によって解析した結果、主に扁球程度の指標となる根径/根長比を表す第1主成分は、完全優性から超優性の形質と推定された。以上のことから、肥大根重および肥大根の形態の均質化にはヘテロシスを利用した F₁ 育種法が有効と考えられた。一方、空洞症は、環境の影響も受けやすく、その軽減には栽培法の改良が必要と考えられた。

続いて、育成した F₁ 品種‘桜島おごじょ’は、既存品種に比べて肥大根重は同等以上で、かつ揃いが良く、肥大根の形態は桜島大根の典型的な扁球であった。また、空洞症の発生が少なく、す入りの発生が遅いという有用特性も持っていた。さらに、‘桜島おごじょ’の F₁ 種子を安定的かつ大量に生産する上で、得られた種子のヘテロ接合性を保証する純度検定法の開発は必須である。このため、本研究ではアブラナ科の *Brassica rapa* L. に対するマイクロサテライトマーカーの適用可能性を検討し、少なくとも 8 種のマーカーが‘桜島おごじょ’の多型解析に利用できることを明らかにした。

最後に、空洞症の発生しにくい施肥方法、株間および播種期について検討した結果、施肥については生育初期の土壤窒素濃度を低くすること、株間については狭くすること、そして、播種期については9月中旬頃に遅らせることが、空洞症抑制に有効であることが明らかになった。特に施肥方法については、肥効調節型窒素肥料を用いることで空洞症の発生を顕著に抑制でき、慣行栽培の追肥重点施肥と同程度の商品収量を確保可能であることが分かった。

上述のとおり、本研究から得られた成果は次の3点にまとめられる。

- ①桜島大根における肥大根重および肥大根の形態、空洞症発生の遺伝様式の解明。
- ②得られた遺伝学的知見に基づいた新品種の育成、新 F₁ 品種‘桜島おごじょ’は、在来品種に比べて、肥大根の均質性が高く、しかも空洞症やす入りの発生が少ない特徴を有する。
- ③安定した F₁ 採種を行うための純度検定法、安定生産を可能とする栽培方法に関する有用知見の取得。

キーワード：F₁、空洞症、桜島、肥大根形、マイクロサテライト

緒 論

ダイコン (*Raphanus sativus* L.) は、アブラナ科に属する植物で、その原産地は地中海沿岸または西南アジアから東南アジアとする説が有力となっている³⁴⁾。しかし、

(連絡先) 大隅支場園芸作物研究室

鹿児島大学 学位論文 (2021年)

ハマダイコン (*Raphanus sativus* L. f. *raphanistroides* Makino) などの野生種は欧州をはじめ、わが国やアメリカ大陸まで広く分布しており、それらが交雑によって生じたという多元説も存在している⁷⁰⁾。約 4,000 年前にはエジプトのピラミッドの壁面に刻まれていることに示されるように、ダイコンの栽培の歴史は極めて古い³⁾。

わが国においても古くから栽培・利用されていた野菜

の一つで、日本書紀(720)には「オホネ(大根)」との記載が認められるとされ、このことから、少なくとも1,300年以上前には、中国あるいは朝鮮半島などから渡来していたものと考えられている³⁵⁾。江戸時代になると、都市近郊野菜園芸の中心的作物として栽培が盛んとなり、多くの品種が分化した。現代の主要品種である宮重系品種(青首ダイコン)や練馬系品種(たくあん用白首ダイコン)は、既にこの時代に成立している¹⁸⁾。明治、大正、昭和、平成へと時代が進む中でもダイコンは主要な冬野菜としての地位を維持してきている。今日でも、栽培面積が31,400ha、出荷量は1,089,000t(農林水産省,2018)と国内野菜の中でパレイショ、キャベツに次ぐ第3位の生産面積を持ち、わが国において主要な野菜の一つとなっている。

近年、地域の独自性に着目し、日本各地に残る地方品種(伝統野菜とも呼ばれる)に注目が集まっている。地方品種は、祖先から続く地域の文化遺産の一つであり、その固有の性質を活用することで、地域活性化を進めようとする動きもある。ダイコンにおいて、地方品種を地域振興に活かす試みは、宮崎県の糸巻き大根⁶²⁾や島根県におけるハマダイコンの栽培化³⁾、秋田県の松館大根⁶⁴⁾など多くの取り組み事例がある。その中で上野大根⁴⁹⁾、松館大根⁶⁴⁾では、自然受粉によって維持されてきた地方品種を選抜母集団としたF₁品種育成(以下F₁化)による商品性の向上が図られている。鹿児島県でも、地域農業を活性化させる取組を推進するため、「かごしまの伝統野菜」を選定し、品目・料理法・入手方法を県ホームページなどで紹介している。ダイコンでは、桜島大根をはじめとして国分大根、横川大根、有良大根、開聞岳大根、山川大根の6種類が選定されている。

桜島大根は、大和本草(1709年)に「薩摩大根は常のより大なり」と記録されており、江戸時代には大きな大根として作られていたとされている。起源は諸説あり、天和年間に愛知県から入手した方領大根の中から変種を発見した選抜系統説、桜島に自生していたハマダイコンの中から生まれた説、始良郡隼人町(現霧島市)で栽培されていた国分大根を西桜島で栽培中にできた説などがある。

200年位前から桜島大根と呼ぶようになり、明治時代の全盛期は200ha程度の栽培があったが、降灰被害やより収益性の高い桜島小みかんなどの果樹栽培への転換によって栽培面積は次第に減少した。1937年頃には50ha程度に⁴⁰⁾、1975年では3ha程度となった²⁰⁾。しかし、その後は徐々に増加し、2019年では8ha程度栽培されている。

桜島大根は、世界一大きい大根として知られており、主な用途は観光土産品の漬物である。漬物は、大きさが分かるようにカットして商品化されており、肥大根の大きさおよび形状(尻づまり)は漬物歩留まりに係る重要な形質となっている。

2018年に桜島大根には血管拡張作用がある機能性成分「トリゴネリン」が多く含まれることが報告された³⁶⁾。このことを契機に、健康食品としても注目され、フリーズドライや煎餅など新たな加工品も増えつつある。

桜島大根の生産で特徴的なこととして、①70cm以上と広い株間、②1穴に30粒程度播種し数回の間引きによって1本立ちとする間引き方法、③多回数の局所施肥方法、④栽培農家が外観の異なる個体を意図的に残し、自殖弱勢を回避する採種方法などがある。

桜島大根の成立は、上述のような農家の経験に基づく複雑な技術に大きく依存してきた。このような状況下、肥大根の大きさや肥大根形の不揃い、空洞症、す入り(図1)の発生など品質低下が問題になっていた。



空洞症



す入り

図1 桜島大根内部の空洞症およびす入り症状
注1) 上: 空洞症, 下: す入り

一般的なダイコンの空洞症は、根部中心部の破生間隙周辺の柔細胞にリグニンが集積し、新たな柔細胞が肥大しないことが原因とされる²⁹⁾。その発生に品種間差があること¹⁹⁾²⁹⁾、地温が高い条件下で発生が多いこと²⁸⁾、窒素施用量と関係が深く、基肥および全体の施肥量が多いと発生が助長されること²¹⁾などの報告がある。一方、

ダイコンのす入りは、急激な根の肥大成長の結果、地上部の同化能力ではその成長がまかないきれず、細胞が崩壊する現象であるとされている¹¹⁾。これには播種期、株間、施肥など栽培環境の影響¹⁰⁾や和歌山大根における施肥方法の影響⁴⁶⁾など、いくつかの知見はある。しかし、桜島大根の空洞症およびす入りの発生について遺伝要因や環境要因の研究は少なく、不明な点が多い。

近年、ダイコンの品種の多くは F₁ 品種であり、地方品種においても、上野大根⁴⁹⁾、松館大根⁶⁴⁾など F₁ 化に成功している事例がある。地方品種の F₁ 化において、安定的に F₁ 種子を得るための採種技術が必須となる。ダイコンの採種は、自家不和合性を利用したミツバチ交配を前提としている。しかし、親系統の自家不和合性が弱いと自殖種子あるいは同一系統内交配種子が混入し、採種種子内の F₁ 種子の割合（以下、F₁ 純度）が低下することも知られている⁴¹⁾。一方、桜島大根において F₁ 純度検定方法に関する研究はみられなかった。

そこで、本研究は前述の種々の課題を解決することを目的として、桜島大根の肥大根重、肥大根形、空洞症の遺伝性を明らかにし、これら情報に基づき、空洞症およびす入りが発生しにくく、揃いの良い F₁ 品種を育成することを目的とした。併せて、F₁ 純度検定可能な DNA マーカーの開発を目指した。さらに、育成した品種について空洞症の発生しにくい栽培方法を検討した。

本論文の内容は以下のとおりである。

まず、第 1 章では桜島大根の F₁ 品種育成に向けて、肥大根重、肥大根形、空洞症のダイアレル解析について報告する。次に第 2 章で、得られた情報を利用して育成した F₁ 品種「桜島おごじょ」の特性について記述し、併せて、安定採種のための F₁ 純度検定に用いる DNA マーカーについて論じる。最後に、第 3 章において、育成した F₁ 品種の空洞症およびす入りの発生しにくい播種期、株間、施肥管理技術など適する栽培技術について論じる。

第 1 章 桜島大根の品種改良のための重要形質の遺伝解析

第 1 節 肥大根重および空洞症のダイアレル解析

1 緒言

量的形質の遺伝解析の方法の一つに 3 親以上を同時に用いて、遺伝効果や親の遺伝子型について解析するダイアレル解析がある。複数親間のあらゆる組み合わせの対について行う交配をダイアレル交配と呼び、ダイアレル交配の各交配組み合わせに 1 対 1 で対応した測定値を基盤目状に配置した表をダイアレル表という。ダイアレル表の測定値に基づいて量的形質の遺伝解析を行うのがダイアレル解析である。すべての組み合わせが揃った場合を完全ダイアレル、正逆交配の片方しかない場合を片側ダイアレルという。

これまでに、イネ³⁸⁾、ダイズ⁵⁷⁾、テンサイ⁵⁰⁾ およびネギ⁴⁸⁾ では、ダイアレル解析によって収量や収穫物のサイズ、初期生育量などの諸形質についての遺伝解析ができることが報告されている。

この解析手法では、ダイアレル交配によって得られた値を分散分析することで、遺伝効果の有意性を検定することや、遺伝子の主効果である相加効果 (a 項) や対立遺伝子間の交互作用である優性効果 (b 項) を評価することができる。また、広義および狭義の遺伝率、平均優性度が推定できる。広義および狭義の遺伝率は 0 ~ 1 の範囲の値をとる。

広義の遺伝率が 1 に近いときは表現型の変異のほとんどすべてが遺伝的であり、反対に 0 に近いときは、表現型の変異のほとんどすべてが環境変異となることを示す。また、狭義の遺伝率が 1 に近いことは遺伝的な変異で、優性効果や環境変異が小さいことを示す。反対に 0 に近いときは 2 通りある。広義および狭義の遺伝率の両方が低いときは、環境変異が大きく、選抜効果が低いことを示す。狭義の遺伝率は低いのが広義の遺伝率が高いときは、優性効果の影響が大きいことを示す。

このように、ダイアレル解析は量的形質に関与する遺伝子の特性、遺伝様式および選抜効果を把握することができる。また、ヘテロシス育種において重要となる組合せ能力を評価するうえで極めて有効である。さらに、F₁ 世代で多数の親系統の優性遺伝子の割合などを同時に解析できるという利点を持つ。

これまで、ダイコンの根の大きさ (2 次元投影面積) に関しては、宮重系品種の近交系のダイアレル解析によって広義の遺伝率が高く、超優性を示すことが報告されている²²⁾。しかし、桜島大根ではその遺伝様式に関する知見はみられない。また、ダイコンの空洞症の発生については品種間差の報告¹⁹⁾²⁹⁾はあるが、遺伝様式に関する報告はない。

そこで本研究では、桜島大根の優良品種を育成するための基礎的遺伝情報を得るために、根の大きさ (肥大根

重), 空洞症 (空洞面積率) について, 8 近交系統を用いて遺伝様式を明らかにするために片側ダイヤレル分析を行った. なお, これら近交系統は自殖を行い固定した. ここでは, その結果の詳細について報告する.

2 材料および方法

(1) 供試材料

異なる農家由来の自然受粉 2 系統から得た自殖 6 系統 (A 農家系統由来: P1, P2, P3 および P4 ; B 農家系統由来: P7 および P8) と丸種 (株) が採種, 販売している自然受粉系統から得た自殖 2 系統 (P5 および P6) の計 8 系統を用いた (表 1). 各系統は, それぞれ形の良い個体を集団内から 1 個体選んで自殖し, その作業を 2 ~ 5 回繰り返して固定化を進めたものである.

これらの各系統を片側ダイヤレル分析の親とし, 2007 年に蓄受粉による 8 × 8 片側ダイヤレル交配の 28 組合わせの F₁ および親 8 系統の自殖種子を得た (表 1, 表 2). 対照系統として, 桜島町農家が作出した自然受粉系統 (以下 SF と略す) と鹿児島県農業開発総合センター (以下, 当センターと略す) 育成の集団採種系統 (以下 G2 と略す) を用いた.

なお, G2 系統の来歴は以下の通りである. 2006 年に農家が採種した種子を用いて 350 個体を栽培し, その中から根が大きく, 空洞症の発生程度が少ない 38 個体を選抜し, 隔離栽培して集団採種した. この種子を 2007 年に播種し, 養成した 380 個体の中から 70 個体を選抜し, 隔離栽培による集団採種によって育成した.

表 1 ダイヤレル分析に使用した親系統の由来, 採種方法, 肥大根重, 空洞症発生株率および空洞面積率

親系統	由来	採種方法	肥大根重 (kg/株)	空洞症	
				空洞症発生 株率 (%)	空洞面積率 (%)
P1	農家A	自殖3代	6.8 ± 0.3 ⁴⁾ a ⁵⁾	70	3.3 ± 2.9 a
P2	農家A	自殖3代	5.4 ± 1.7 ac	100	3.9 ± 2.3 a
P3	農家A	自殖3代	1.6 ± 1.3 b	100	12.5 ± 3.2 a
P4	農家A	自殖3代	1.5 ± 0.3 b	100	39.1 ± 10.5 b
P5	種苗 ³⁾	自殖3代	5.7 ± 0.1 a	90	16.5 ± 7.7 a
P6	種苗	自殖3代	3.5 ± 0.7 bcd	70	7.3 ± 2.8 a
P7	農家B	自殖6代	5.3 ± 0.6 ad	100	13.2 ± 2.2 a
P8	農家B	自殖3代	5.9 ± 0.9 a	100	10.8 ± 5.7 a
対照系統					
SF ¹⁾	農家A	自然受粉	5.0	100	21.4
G ₂ ²⁾	農総セ	自然受粉	8.2	40	2.2

注 1) 農家が自然受粉によって 1993 年に採種し, その種子を当センターで保存していた系統

注 2) 当センター集団選抜系統

注 3) 種苗: 丸種 (株) から購入

注 4) 平均値 ± 標準偏差

注 5) Tukey 検定によって異なる英字間は 5 % 水準で有意差あり

表 2 肥大根重, 空洞面積率の片側ダイヤレル表と MP ヘテロシス

形質	親系統	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	F ₁ 平均
肥大根重 (kg/株)	P1	6.8	8.0	6.5	7.1	8.5	9.6	10.9	9.6	8.6
	P2	31	5.4	6.4	6.5	7.9	9.2	10.3	8.3	8.1
	P3	54	81	1.6	2.8	7.3	7.6	9.4	7.4	6.8
	P4	70	87	81	1.5	6.5	7.0	8.0	5.5	6.2
	P5	37	43	102	80	5.7	9.1	9.7	7.8	8.1
	P6	87	106	195	106	99	3.5	10.3	8.3	8.7
	P7	81	93	175	137	68	134	5.3	10.1	9.8
	P8	52	47	97	49	35	77	82	5.9	8.1
	F ₁ 平均									
親平均										4.5
空洞 面積率 (%)	P1	3.3	3.9	3.6	6.3	5.6	3.5	12.2	6.5	5.9
	P2	8	3.9	2.9	13.2	21.5	5.7	12.4	18.0	11.1
	P3	-55	-65	12.5	19.4	12.5	5.1	18.8	8.3	10.1
	P4	-70	-39	-25	39.1	10.2	7.5	22.8	12.7	13.2
	P5	-43	110	-14	-63	16.5	6.9	9.5	6.1	10.3
	P6	-33	2	-48	-71	-42	7.3	6.5	3.5	5.5
	P7	47	44	46	-13	-30	-37	13.2	9.2	13.0
	P8	-8	145	-29	-49	-55	-62	-23	10.8	9.2
	F ₁ 平均									
親平均										13.3

注 1) 表の対角線上の斜体は親系統の平均値, 表の対角線から上は親系統間の F₁ の平均値

注 2) 表の対角線から下は, 中間親 (MP) 比 中間親 (MP) 比 (%) = (F₁-MP) × 100/MP

また、空洞症の発生程度の少ない個体の選抜は、2段階で行った。まず、収穫後に葉部を葉長5 cm程度まで切断した後に、肥大根下部の直径約5 cmの部位を輪切りにし、空洞症が確認された個体は除外した。次に空洞症が認められなかった個体を水に投入し、根部が水面下まで沈む個体を空洞症の発生程度が少ない個体として選抜した。

(2) 栽植様式

畝間120 cm, 株間100 cmの白色マルチ栽培とし、2008年9月25日に1か所に3粒播種し、10月27日に1株に間引きした。施肥は、基肥としてN, P₂O₅, K₂Oをそれぞれ0.5kg・a⁻¹:1.0kg・a⁻¹:0.4kg・a⁻¹とし、また、ホウ素を36g施用した。さらに、追肥はN:K₂Oを播種後43日, 67日および83日目の3回に分けて、いずれも合計で0.8 kg・a⁻¹施用した。供試株数は1区5株(6 m²)で行い、2反復とした。収穫は2009年1月19日に行った。

(3) 測定方法

肥大根重は、すべての葉部を切断し、根端部の直径が約1 cmの部位で切り揃えて生体重を測定した。

(4) 空洞症の測定方法

本論文は、空洞症の発生について注目した研究である。ここで、本論文を通じて行った空洞症を定量化するために実施した空洞症測定方法について説明する。

①空洞面積率：根の断面積空洞部面積は、縦割りにした根を水平に置き、デジタルカメラ(CANON PowerShot S30, キヤノン)で写真撮影した画像を2値化し、画像処理ソフト(フリーウェア, LIA32)を使用して測定し、断面積に対する空洞部面積の割合を空洞面積率とした。

②空洞症発生株率：目視によって空洞症の発生を確認し、空洞症が発生した株の割合とした。

③空洞発生度：空洞面積率をその値から0：空洞なし, 1：空洞面積率5%未満, 2：5%以上10%未満, 3：10%以上15%未満, 4：15%以上の指数で評価し、 $[\Sigma(\text{空洞程度} \times \text{発生株数}) / (\text{調査株数} \times 4)] \times 100$ とした。これらの方法で発生状況に応じて空洞症を定量化した。

(5) ダイアレル分析

ダイアレル分析の計算プログラムにはDIAL98⁶⁸⁾を用いた。中間親(MP)に対するヘテロシス(以下中間親比)は、以下の式を用いて求めた。

ヘテロシス(MP%) = $100 \times (F_1 \text{ 値} - \text{MP 値}) / \text{MP 値}$

3 結果および考察

本研究で片側ダイアレル交配に用いた親系統の肥大根重は、1.5 ~ 6.8kg(平均4.5kg)の範囲でバラツキ、親

系統のなかには農家の自然受粉系統SF(5.0 kg)を超える系統もあったが、集団選抜系統G2(8.2 kg)を超える系統は認められなかった(表1)。

また、空洞発生株率は70 ~ 100%と高かったが、空洞面積率は3.3 ~ 39.1%と系統間で大きく異なり、特に親系統P4で高かった。これら特性の異なる親系統を用いて片側ダイアレル交配を行ったところ、得られたF₁の肥大根重は2.8 ~ 10.9 kg(平均8.1 kg)の値を示し、SFやG2の肥大根重より重いF₁系統も多数認められた。また、中間親比は31 ~ 195%(平均85%)と高いヘテロシスを示した(表2)。

空洞面積率は肥大根重と異なりF₁で2.9 ~ 22.8%(平均9.8%)の値を示し、中間親比は負の値を示し、中間親値より空洞面積率が小さいF₁が多かった。

まず、Jones²⁶⁾の方法に基づく肥大根重、空洞面積率の8×8片側ダイアレル分散分析の結果を表3に示す。肥大根重は、a項, b項のいずれも有意で、b1項の平均平方が161.18とa項24.95に比べて有意に高く、相加効果よりも優性効果の寄与が大きいと考えられた。b項は、b1項(平均優性効果)とb2項(特定親の優性効果)が有意で、b3項(特定組合せの優性効果)は有意でなかった。

このことから、平均的に親とF₁には大きな差が存在し、その差は特定の親が関係しているが、特定の組合せに依存する部分は小さいと考えられた。空洞面積率はa項, b項ともに有意で、平均平方の値はa項296.87とb項60.57と、a項が有意に高かった。このことから、空洞面積率は肥大根重と異なり、優性効果に比べて相加効果の寄与が大きいと考えられた。

表3 肥大根重および空洞面積率の片側ダイアレル表の分散分析

要因	自由度	平均平方	
		肥大根重	空洞面積率
反復	1	0.19	16.06
a (相加効果)	7	24.95 **	296.87 **
b (優性効果)	28	7.40 **	60.57
b1 (平均)	1	161.18 **	155.65 *
b2 (特定親)	7	4.08 **	95.40 *
b3 (特定組合せ)	20	0.88	43.62
誤差	35	0.82	37.55

注1) 分散分析はJones(1965)の方法によって行った
** : 1%, * : 5%水準で有意性あり

表4 片側ダイヤレル表における Wr-Vr の分散分析

要因	肥大根重		空洞面積率	
	自由度	平均平方	自由度	平均平方
系列	7	1.26	7	930
誤差	8	0.86	8	1,929

表5 片側ダイヤレル分析から推定された遺伝成分

遺伝成分	根重	空洞面積率
相加分散	D	3.59
優性分散	H1	9.79
	H2	8.20
平均優性度	$\sqrt{H1/D}$	1.65
固有遺伝率	$D/(D+E^1)$	0.90
広義の遺伝率		0.92
狭義の遺伝率		0.53
選抜限界(max)	8.84	-

注1) E:環境分散

次に、エピスタシスの有無と親系統の優性遺伝子の割合を明らかにするために、Vr (片親を共通とした r 番目の系列の分散) と Wr (r 番目の系列の F_i と非共通親との共分散) の関係について検討した。エピスタシスは、異なる遺伝子座間の交互作用である。量的形質に2つの遺伝子座が関与し、両座の相加効果と優性効果の和だけでは遺伝子型値のすべてを説明できない。このとき2つの遺伝子座間に交互作用があることを示し、これをエピスタシスという。

このエピスタシスの有無の検定は、Wr-Vr の均一性に関する分散分析によって行った。その結果、親系列間に有意性が示されず (表4)、いずれの形質もエピスタシスのない相加・優性モデルに適合していると考えられた。親系統の優性遺伝子の割合は、Wr に対する Vr の回帰である Vr/Wr 図から分析できる。

例えば、Vr/Wr 図において左下方に位置する点は優性対立遺伝子を多く持つ親に相当し、逆に右上方に位置する点は劣性対立遺伝子を多く持つ親に相当する。つまり、P1, P2, P5, P7 および P8 が肥大根重において優性遺伝子を多く持ち、P3, P4 および P6 が劣性遺伝子を多く持つと考えられた (図2)。空洞面積率は、P4 が劣性遺伝子を多く持つと考えられた (図3)。

表5に、片側ダイヤレル分析から推定された遺伝成分を示す。肥大根重については、広義の遺伝率は0.92と高かったのに対し、狭義の遺伝率は0.53と低く、優性効果の寄与が大きく、平均優性度は1.65と1以上であり超優性の形質であると推定された。一方、空洞面積率

については、広義の遺伝率0.67、狭義の遺伝率0.40と肥大根重に比べていずれも低く、平均優性度は0.91で、完全優性に近い不完全優性の形質であると推定された。

さらに、優性遺伝子の平均的な作用方向を明らかにするために、Pr (親の値) と Vr+Wr の相関を検討した。肥大根重の優性遺伝子の作用は、Pr と Vr+Wr の相関係数が有意な負の値-0.94であったことから (図4)、平均的に肥大根重を高める方向に働くと考えられた。空洞面積率の優性遺伝子は、Pr と Vr+Wr の相関係数が有意な正の値0.83であったことから (図5)、空洞の発生を抑える方向に作用すると考えられた。

肥大根重についてはダイヤレル交配の後代から得られる純系親の遺伝子型値の最大値、すなわち選抜限界を推定した。選抜限界は、Vr/Wr 図の限界放物線上の完全優性親の Vr と Wr の値を求め、Pr と Vr+Wr の回帰式にその値を代入して求めた。肥大根重の選抜限界は8.84 kg であった (表5)。

最後に、ダイヤレル分析によって推定した値の信頼性について検討した。ダイヤレル分析の結果が有効であるためには、固有遺伝率が0.8以上であることが必要であり、その値より低いと遺伝成分の推定値の標準誤差が大きくなり、結果の信頼性が著しく低くなる (鶴飼, 2002)。

本試験の固有遺伝率は肥大根重0.90、空洞面積率0.85 (表5) といずれも0.8以上であり、本研究のダイヤレル分析結果は有効と考えられた。本研究結果において、肥大根重の遺伝様式は広義の遺伝率が高く、超優性の形質と推定された。ダイヤレル分析から推定した選抜限界8.84 kg や集団選抜系統G2の肥大根重8.2 kg に比べて高い値を示す F_i が多数認められたことは、桜島大根における F_i 育種の有利性を示している。

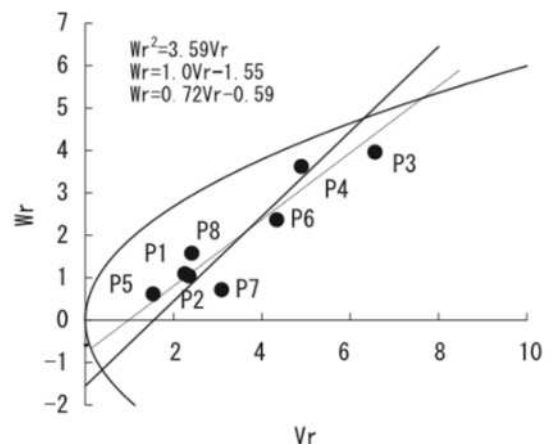


図2 ダイヤレル分析における肥大根重の Vr/Wr 図および Vr (系列分散) に対する Wr (系列と親の共分散) の回帰

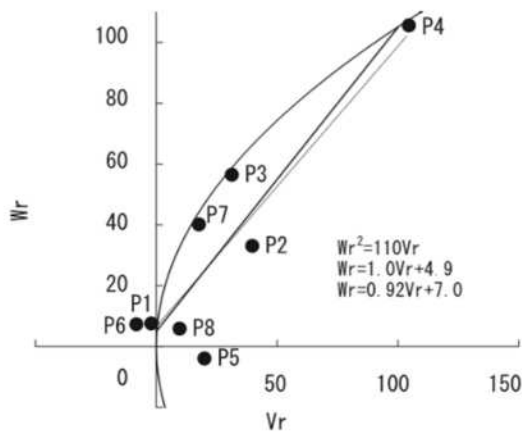


図3 ダイアレル分析における空洞面積率の Vr/Wr 図および Vr (系列分散) に対する Wr (系列と親の共分散) の回帰

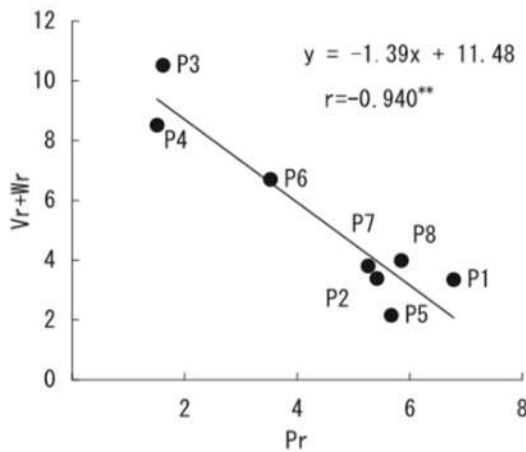


図4 肥大根重の親系統の値 (Pr) と片親を共通とした r 番目の系列の分散 (Vr) + r 番目の系列の F_i と非共通親との共分散 (Wr) の相関

注1) **: 1%水準で有意性あり

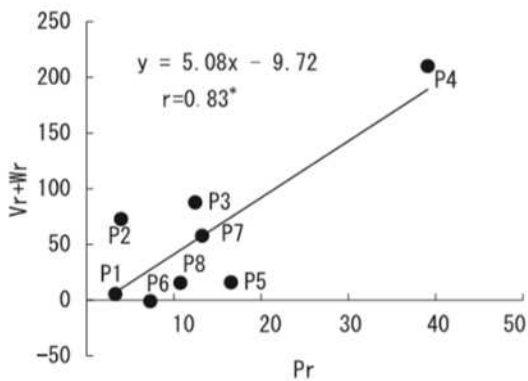


図5 空洞面積率の親系統の値 (Pr) と片親を共通とした r 番目の系列の分散 (Vr) + r 番目の系列の F_i と非共通親との共分散 (Wr) の相関

注1) *: 5%水準で有意性あり

本研究結果の空洞面積率の遺伝様式は、広義ならびに狭義の遺伝率ともに肥大根重に比べて低く、空洞症の発生は環境の影響を受けやすい形質であることが明らかになった。このことから、空洞症の評価は、環境による影響の少ない整備されたほ場で比較試験を繰り返しながら選抜する必要があり、選抜は個体単位でなく系統単位で行うことが望ましいと考えられた。また、空洞症に関わる優性遺伝子は空洞の少ない方向に作用することから、F_i 育種において片親に空洞症の発生が少ない系統を用いることで、空洞症が発生しにくい F_i 品種を育成することも可能であろう。また、肥大性の優れた桜島大根を育成するためには、F_i 育種が有効であることが明らかになった。

第2節 肥大根形のダイアレル解析

1 緒言

桜島大根は丸大根で、水平方向の肥大が大きくやや扁平（以下扁球とする）であり、その形は他品種と差別化できる重要な形質である。ただし、遺伝的に雑ばくなため、扁球の程度や尻づまりの優劣（図6）など、肥大根の形状には系統間および個体間差がかなり認められ、その均一性が強く要望されている。主な用途は漬物であることから、実需者および生産者からは尻づまりで歩留まりの優れた形状が求められている。このような肥大根形に対する多様な要望に応え、優良品種を育成するためには、詳細な肥大根形の遺伝情報を得ることが必要不可欠である。しかしながら、従来の知見は桜島大根の肥大根長および肥大根径に関するものが多く、尻づまりなどを含めた詳細な肥大根形の遺伝解析はほとんど行われていない。

農業分野における形の計測の研究は、これまでにナシの葉形³⁰⁾、ダイズの葉形³¹⁾およびハナハス花卉⁶⁷⁾など多くの栽培種で報告があり、品種識別および形質のデータベース化などに利用されている。特に成果を挙げている手法の一つとして、楕円フーリエ記述子を用いた定量化がある。この手法は、形の輪郭の座標を周期関数として表現し、そのフーリエ級数展開を行い、級数の係数によって形を記述するものである。このように、輪郭を数学的に記述することで、微細な形の変異の情報を抽出することが可能である。この手法に基づき形状解析が容易にできる Windows プログラム SHAPE が開発されている²⁵⁾。

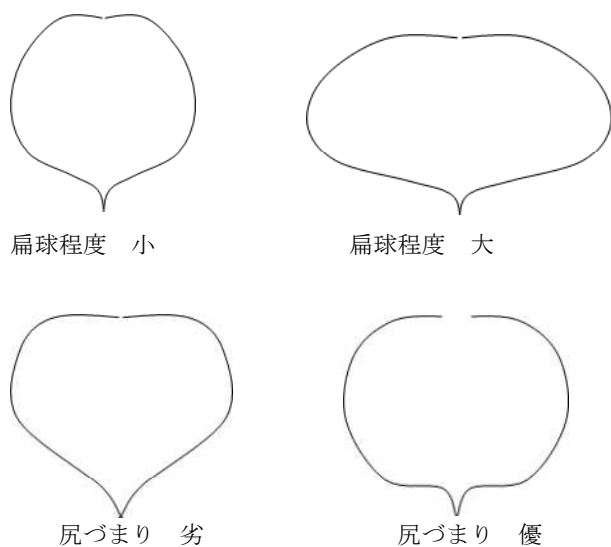


図6 扁球の程度および尻づまりの優劣

また、このソフトを使用して、ダイコンの肥大根長に対する肥大根径の比（以下根長／根径比と略する）および尻づまりの程度などの遺伝様式が明らかにされている²³⁾。さらに、ダイコンの生育時期の違い²³⁾および土壌タイプの違い²⁴⁾は、根長／根径比の遺伝効果に与える影響は小さいが、それらの違いは尻づまりの程度に影響があり、その遺伝効果と土壌タイプの間には交互作用があると報告されている。一方、桜島大根の肥大根形については、収穫時期（12月20日、1月26日および2月21日）の違いがその形に及ぼす影響について検討され、収穫時期が遅いほど縦長形の割合が低く、扁球の割合が高まると報告されている³⁷⁾。しかし、その遺伝的な知見に関する報告はない。

そこで、本研究では、自然受粉系統から自殖を行い固定した8近交系統を用い、肥大根形に関する形質の片側ダイアレル分析を行い、その遺伝様式を明らかにすることを試みた。

2 材料および方法

(1) 供試材料

供試材料には、異なる農家由来の自然受粉2系統から得た自殖6系統（A農家系統由来：P1, P2, P3およびP4；B農家系統由来：P7およびP8）、および丸種（株）から販売されている自然受粉品種から得た自殖2系統（P5およびP6）の計8系統を用いた。

各系統は、集団内から1個体選んで自殖し、さらに自殖を2～5回繰り返して固定化を進めたものである。これらを片側ダイアレル分析の親とし、2007年に蕾受粉を行い8×8片側ダイアレル交配によって、28組合わ

せのF₁と親8系統の自殖種子を得た。

栽植様式は畝間120 cm、株間100 cmの白色マルチ栽培で行った。2008年9月25日に1か所に3粒播種し、10月27日に1株に間引きした。施肥は、基肥としてN、P₂O₅、K₂Oをそれぞれ0.5 kg・a⁻¹:1.0 kg・a⁻¹:0.4 kg・a⁻¹、また、ホウ素を36 g・a⁻¹施用した。播種後43、67および83日目に追肥を行い、N:K₂Oをそれぞれ0.27 kg・a⁻¹ずつ施用した。供試株数は1区5株（6 m²）とし、2反復とした。収穫は2009年1月19日に行った。

(2) 肥大根形の解析

肥大根長は、すべての葉部を切断し、葉部切断面から肥大根先端部の直径約1 cm部位で切り揃えた肥大根先端部までの長さを測定した。肥大根径は、肥大部の最大部付近を2か所測定し、その平均値とした。肥大根形画像は、側根を除去して縦割りにしたものを黒色の布の上に水平に置き、デジタルカメラ（CANON PowerShot S30、キヤノン）で撮影した。その後、その画像を画像処理ソフトPhotoshopで2値化した（図7）。これらの画像に対してノイズ除去を行った後、輪郭を抽出し、その輪郭の座標情報をチェーンコード記述法によって保存した。さらに、その輪郭情報から楕円フーリエ記述子を導き、フーリエ係数に含まれる形状情報を要約するために、係数の主成分分析を行った。

フーリエ係数にはan、bn、cnおよびdnがあり、anおよびdnは対称変異に、bnおよびcnは非対称変異に関係する。本研究では、根の中心軸に対して対称的な形状変異（以下対称変異と略する）を抽出するために、係数anとdnを選択して主成分分析を行った。

これらの楕円フーリエ記述子に基づく形状解析は、楕円に基づく生物形態の量的評価のためのコンピュータープログラムパッケージSHAPE²⁵⁾を用いて行った。

(3) ダイアレル分析

ダイアレル分析は、肥大根長、肥大根径、SHAPEから得られた第1主成分（PC1）および第2主成分（PC2）の主成分得点を、反復単位で平均した値を使用して行った。ダイアレル分析の計算プログラムには、DIAL98⁶⁸⁾を用いた。

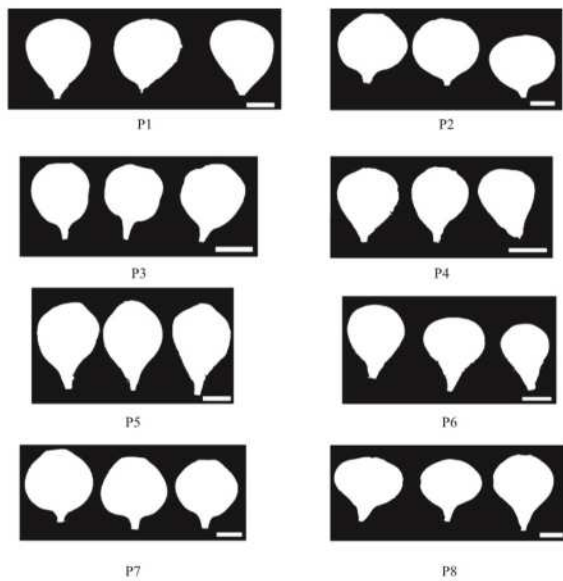


図7 親系統の写真を2値化した肥大根形

注1) バーは10 cmを示す

3 結果および考察

(1) SHAPEで抽出された肥大根形の対称変異

SHAPE プログラムに基づき抽出された肥大根形の対称変異の主成分分析結果および PC1 ~ PC3 に抽出されたその変異を図8に示す。PC1の寄与率は83.0%と極めて高く、PC2は6.2%、PC3は5.5%と、PC1~PC3で対称変異における情報量の94.7%が要約された。また、これらの輪郭は、対応する主成分得点を平均(0) ± 2 × 標準偏差に他の主成分得点を0とし、主成分得点から逆フーリエ変換によって再構築した図である。この図から、各主成分が要約した情報を視覚的に解釈できる。PC1は主に根径/根長比の指標、PC2は主に肩張りおよび尻づまりの程度の指標、PC3はPC2と類似した特徴の指標になると考えられた。

すなわち、PC1は値が大きいほど肥大根長に対し肥大根径が大きく扁球、逆に値が小さいほど根長に対し肥大根径が小さく縦長の円筒形を示した。PC2は値が大きいほど肩張りの程度が小さく、尻づまりの良い球形を示し、値が小さいほど肩張りが強く先尖りの逆円錐形を示した。PC3は値が大きいほど肩張りが強く先尖りの逆円錐形を示し、値が小さいほど肩張りが弱く、尻づまりの良い球形を示し、PC2と反対の傾向であった。しかし、抽出された肥大根形の特徴はPC2と類似していたため、ダイアレル分析から除いた。

(2) ダイアレル分析

本研究の親系統における肥大根長、肥大根径および肥大根形の主成分得点を表7に示す。

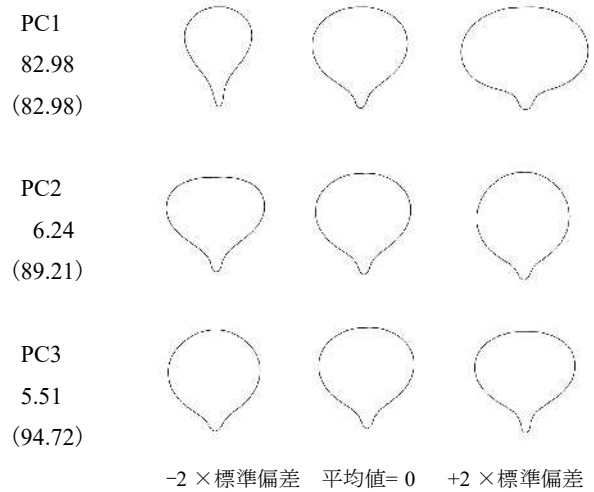


図8 SHAPEによる肥大根形の主成分分析結果および抽出された主成分別の肥大根形変異

注1) 各輪郭は、対応する主成分得点を平均(0) ± 2 × 標準偏差に、他の主成分得点を0とし、主成分得点から逆フーリエ変換によって再現した図

注2) 図中の数値は寄与率、()内は累積寄与率を示す

肥大根長では21.3 ~ 37.6 cm、肥大根径では14.0 ~ 24.1 cmの変異が認められた。P3およびP4は、肥大根長および肥大根径が他に比べて短く、サイズが小さい系統であった。SHAPEによって抽出された対称変異の主成分得点についてみると、主に根長/根径比の指標となるPC1はP3、P4、P5およびP6が小さく、P2およびP7が大きかった。また、主に肩張りおよび尻づまりの程度の指標となるPC2は、P1およびP8が大きかった。

表7に、片側ダイアレルによる28組合せのF₁の値と平均値を示す。肥大根長、肥大根径およびPC1は、F₁の平均値が親の平均値に比べて大きく、PC2では逆に小さかった。Jones²⁶⁾の方法に基づく片側ダイアレル分散分析の結果を、表8に示す。

表6 ダイアレル分析に使用した親系統の由来, 採種方法, 肥大根長, 肥大根径および肥大根形の主成分得点

親系統	由来	採種方法	肥大根長 (cm)	肥大根径 (cm)	肥大根形の主成分得点 ³⁾	
					PC1	PC2
P1	農家A	自殖3代	31.0 a ²⁾	24.1 a	-811 b	-15 ab
P2	農家A	自殖3代	30.4 a	22.2 ab	756 b	327 a
P3	農家A	自殖3代	26.0 ab	14.0 c	-2645 a	799 a
P4	農家A	自殖3代	21.3 b	14.7 c	-1876 a	72 ab
P5	種苗 ¹⁾	自殖3代	37.6 a	22.3 ab	-2019 a	216 ab
P6	種苗	自殖3代	35.7 a	19.0 ab	-2780 a	341 a
P7	農家B	自殖6代	35.9 a	21.7 ab	549 b	542 a
P8	農家B	自殖3代	31.6 a	23.9 a	-341 b	-390 b

注1) 丸種(株)から購入

注2) Tukey検定によって, 異なる英字間は5%水準で有意性あり

注3) 値は $\times 10^4$

表7 肥大根長, 肥大根径および肥大根形の主成分得点の片側ダイアレル表

形質	親系統	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	F ₁ 平均
肥大根長 (cm)	P1	<u>31.0</u>	30.8	32.3	30.9	36.9	35.7	37.0	34.8	34.1
	P2		<u>30.4</u>	31.1	31.7	34.7	36.5	36.3	34.3	33.6
	P3			<u>26.0</u>	25.8	38.8	41.6	37.5	35.3	34.6
	P4				<u>21.3</u>	33.9	37.6	34.4	28.8	31.9
	P5					<u>37.6</u>	41.5	38.5	37.3	37.4
	P6						<u>35.7</u>	37.8	38.1	38.4
	P7							<u>35.9</u>	36.4	36.9
	P8								<u>31.6</u>	35.0
	F ₁ 平均									
親平均										31.2
肥大根径 (cm)	P1	<u>24.1</u>	26.7	25.4	26.5	26.3	29.7	29.5	28.8	27.6
	P2		<u>22.2</u>	25.3	25.1	26.5	28.5	30.7	27.4	27.2
	P3			<u>14.0</u>	18.4	24.9	25.0	28.5	25.8	24.7
	P4				<u>14.7</u>	25.0	24.9	27.6	23.1	24.4
	P5					<u>22.3</u>	26.7	28.7	25.8	26.3
	P6						<u>19.0</u>	29.8	27.0	27.4
	P7							<u>21.7</u>	28.9	29.1
	P8								<u>23.9</u>	26.7
	F ₁ 平均									
親平均										20.2
PC1 ¹⁾	P1	<u>-811</u>	1,400	739	170	-159	236	-256	1,855	569
	P2		<u>756</u>	1,485	1,237	480	1,620	1,448	2,160	1,404
	P3			<u>-2,645</u>	-1,343	471	-1,598	-264	155	-51
	P4				<u>-1,876</u>	-82	-1,305	-362	151	-219
	P5					<u>-2,019</u>	-887	-477	-108	-109
	P6						<u>-2,780</u>	876	315	-106
	P7							<u>549</u>	1,919	412
	P8								<u>-341</u>	921
	F ₁ 平均									
親平均										-1,146
PC2 ¹⁾	P1	<u>-15</u>	200	56	-471	-125	-302	-41	236	-64
	P2		<u>327</u>	-39	-276	355	-1	-62	-77	14
	P3			<u>799</u>	-248	267	-222	-92	100	-26
	P4				<u>72</u>	0	-202	-310	-177	-241
	P5					<u>216</u>	-151	-40	98	58
	P6						<u>341</u>	-71	-265	-173
	P7							<u>542</u>	159	-65
	P8								<u>-390</u>	11
	F ₁ 平均									
親平均										237

注1) 値は $\times 10^4$

注2) 下線は親系統の値を示す

相加効果 a 項および優性効果 b1 項（平均優性効果）は、すべての形質で有意であった。

さらに、肥大根径、PC1 および PC2 では b2 項（特定親の優性効果）が有意であり、PC1 では加えて b3 項（特定組合せの優性効果）も有意であった。これらのことから、すべての形質で、平均的に親と F_1 に大きな差が存在していると考えられた。また、その差には、PC1 では特定の親および特定の組み合わせの両方が関係しており、肥大根径および PC2 は特定の親が関係しているが、特定の組み合わせに依存する部分は小さいと考えられた。次に、親系統の優性遺伝子の割合を明らかにするために、 W_r (r 番目の系列の F_1 と非共通親との共分散) に対する V_r (片親を共通とした r 番目の系列の分散) の回帰である V_r / W_r 図を分析した。まず、 V_r / W_r 図の回帰直線の傾きが 1 より著しく小さい場合には、エピスタシス（非対立遺伝子間交互作用）が存在している可能性がある。

このような場合は、回帰直線から特に離れて位置する親を除いて、再度分析することが行われる⁵⁾。本研究において、PC2 の回帰直線の傾きが 0.50 と小さかったため、回帰直線から離れて位置した P1 および P8 を分析から除いて 6 × 6 ダイアレルとしたところ、回帰直線の傾きが 0.738 となり、1 に近づいた（図 9）。以下、PC2 については 6 × 6 ダイアレルに基づき分析を行った。

V_r / W_r 図において、左下方に位置する点は優性対立遺伝子を多く持つ親に相当し、逆に右上方に位置する

点は劣性対立遺伝子を多く持つ親に相当する。すなわち、優性遺伝子を多く持つ親系統は、肥大根長では P1, P2, P5, P6, P7 および P8 であり、肥大根径では P1, P2, P5, P7 および P8 であると考えられた。また、PC1 では P1, P2, P5 および P7 が、PC2 では P3, P4, P5, P6 および P7 が優性遺伝子を多く持つものと推定された。それに対して劣性遺伝子を多く持つ親は、肥大根長および肥大根径では P3 および P4 であり、PC1 では P3 および P6, PC2 では P2 であると考えられた。さらに、エピスタシス（非対立遺伝子間交互作用）の有無を明らかにするために、 W_r - V_r の均一性に関する分散分析によって、エピスタシスの有無の検定を行った。その結果、いずれの形質においても親系列間に有意性が示されず、エピスタシスのない相加・優性モデルに適合していると考えられた。

最後に、表 9 に片側ダイアレル分析によって推定された遺伝成分および P_r (親の値) と V_r+W_r の相関係数を示す。肥大根長は、広義の遺伝率が 0.81 と高い値を示し、狭義の遺伝率も 0.62 とやや高かったことから、優性効果だけでなく相加効果も高いと考えられた。肥大根径および PC1 は、広義の遺伝率が高かったのに対して狭義の遺伝率がやや低かったことから、優性効果の寄与が大きいと考えられた。PC2 は、広義の遺伝率が 0.63、狭義の遺伝率が 0.18 と他形質に比べて低かったことから、優性効果の寄与が大きい一方で、環境の影響も受けやすい形質であると考えられた。

表 8 肥大根長、肥大根径および肥大根形の主成分得点の片側ダイアレル表の分散分析

要因	自由度	平均平方			
		肥大根長	肥大根径	PC1 ¹⁾	PC2 ¹⁾
反復	1	10.33 ns	0.04 ns	88 ns	0 ns
a (相加効果)	7	128.81 **	60.32 **	871 **	2 **
b (優性効果)	28	14.92 ns	22.72 **	178 **	1.3 **
b1 (平均)	1	181.44 **	508.30 **	2,776 **	11 **
b2 (特定親)	7	8.98 ns	9.48 **	70 *	2.3 **
b3 (特定組合せ)	20	8.67 ns	3.07 ns	86 **	0.4 ns
誤差	35	10.93	2.89	30	0.4

注 1) 値は $\times 10^4$

注 2) 分散分析は Jones²⁰⁾ の方法で行い、**は 1%水準、*は 5%水準で有意性あり、ns は有意性なし

表 9 片側ダイアレル分析から推定された遺伝成分

遺伝成分	肥大根長	肥大根径	PC1 ²⁾	PC2 ²⁾
相加分散 D	26.44	14.39	175.66	21.23
優性分散 H1	15.91	28.66	245.30	36.65
H2	14.76	25.23	224.67	30.56
平均優性度 $\sqrt{H1/D}$	0.78	1.41	1.18	1.31
V_r+W_r と P_r の相関係数	-0.87 **	-0.98 **	-0.74 *	0.96 **
固有遺伝率 $D/(D+E^{1)})$	0.87	0.92	0.92	0.77
広義の遺伝率	0.81	0.90	0.90	0.63
狭義の遺伝率	0.62	0.44	0.54	0.18

注 1) 環境分散

注 2) 値は $\times 10^4$

注 3) **は 1%水準、*は 5%水準で有意性あり

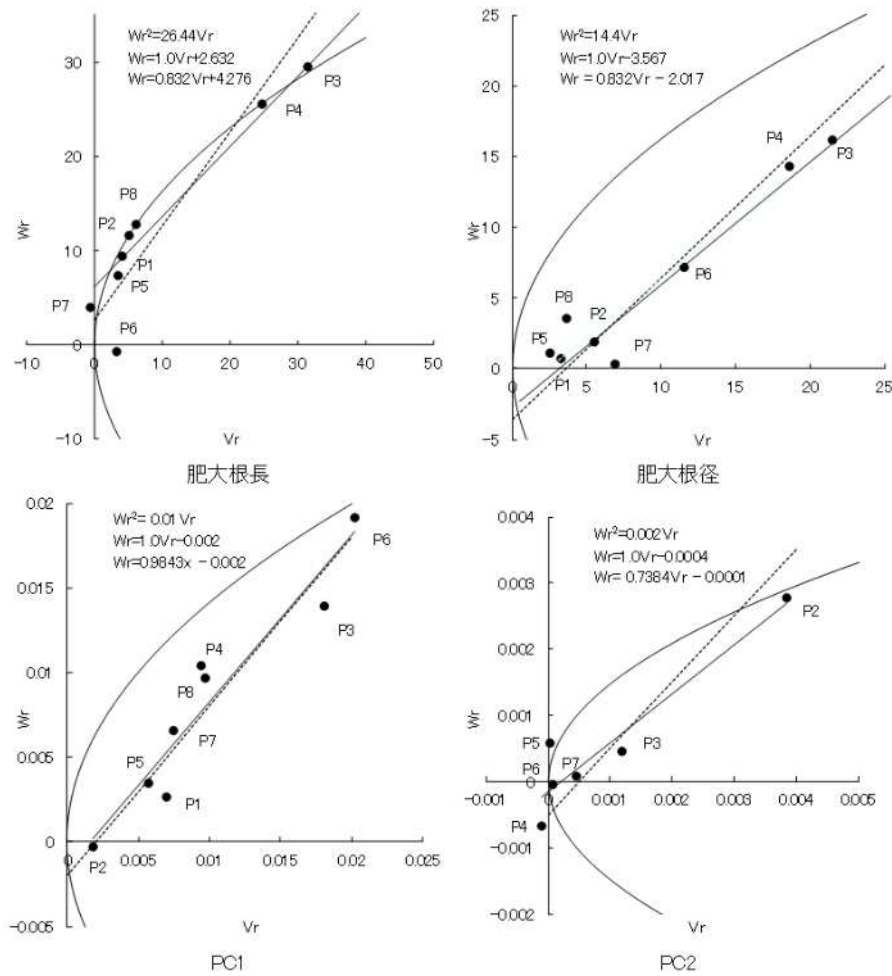


図9 ダイアレル分析における各形質の Vr / Wr 図および Vr (系列分散) に対する Wr (系列と親の共分散) の回帰

肥大根長は平均優性度が 0.78 と 1 以下であったことから、不完全優性と考えられた。また、肥大根径および PC2 は、平均優性度がそれぞれ 1.41, 1.31 と 1 以上であったことから、超優性であると推定された。一方、PC1 は平均優性度が 1.18 であり、完全優性から超優性の形質であると推定された。Pr と Vr+Wr の相関係数は、肥大根長、肥大根径および PC1 では負の値を示した。これらのことから、3 形質の優性遺伝子は、それぞれ肥大根長を長くする方向、肥大根径を大きくする方向、肥大根形を扁球にする方向に作用すると考えられた。逆に、PC2 では正の値を示したことから、その優性遺伝子は肩張りを大きくし、先尖りの逆円錐形になる方向に作用すると考えられた。

ダイコンの肥大根形関連形質のダイアレル分析に関しては、これまでいくつかの報告がある。まず、肥大根長および肥大根径について、日本のダイコン 10 系統を用いた完全ダイアレル分析が行われ、いずれの遺伝様式も

不完全優性であると報告されている⁴⁵⁾。また、根径/根長比および尻づまり程度の遺伝様式については、円筒形の宮重系品種 6 系統の完全ダイアレル分析によって、いずれも不完全優性の形質であると推定されている²²⁾。

本研究によって推定された桜島大根の肥大根形関連形質の遺伝様式は、肥大根長が不完全優性、肥大根径が超優性、主に根径/根長比の指標となる PC1 が完全優性から超優性、主に肩張りおよび尻づまり程度の指標となる PC2 が超優性であった。

これらのことから、桜島大根の肥大根長の遺伝様式は日本の他の品種群と同様であるが、本品種独特の扁球に強く関わる形質である肥大根径、PC1 および PC2 の遺伝様式は異なり、優性から超優性を示すことが明らかになった。第 1 章において、桜島大根の肥大根重が超優性の形質であり、肥大の優れる品種の育成には F₁ 育種が有効であることが明らかになっている⁵⁹⁾。

本研究によって明らかになった肥大根形についての遺

伝情報は、桜島大根の F₁ 育種において、肥大根形に対する多様な要望に利用できると考えられる。例えば、典型的な扁球の品種育成には、肥大根の横方向への肥大を促進する肥大根径の優性遺伝子、あるいは扁球を高める方向に作用する PC1 の優性遺伝子を両親系統のいずれかに持たせ、F₁ において集積させることが有効である。

また、これらの形質の遺伝様式が完全優性から超優性であることから、ヘテロシスを有効に活用できると考えられる。

さらに、尻づまりを向上させるためには、尻づまりを良くする方向に働く PC2 の劣性遺伝子を集積させた両親系統を用い、それらの F₁ 組合せが有効であると考えられた。なお、PC2 は、広義および狭義の遺伝率が低く、環境に影響されやすい形質であるため、その選抜には環境の影響が小さい土壌養分などの均一なほ場で行う必要があると考えられた。

第2章 F₁ 品種‘桜島おごじょ’の育成

第1節 F₁ 品種‘桜島おごじょ’の育成とその特性

1 緒言

桜島大根において肥大根の大きさや形にバラツキが大きく、空洞症やす入りなどの内部障害の発生が問題となっている。そこで、当センターでは、肥大根の均一化、空洞症およびす入りが発生しにくいことを育種目標として、桜島大根の F₁ 化を試みた。

本節では、F₁ 品種‘桜島おごじょ’の育成経過とその特性について報告する。併せて、‘桜島おごじょ’と①市販の自然受粉品種3種、②‘桜島おごじょ’の両親系統2種について収量特性、空洞症およびす入りの発生を比較し、桜島大根の F₁ 化による品質向上効果を検討した。

2 材料および方法

(1) F₁ 品種‘桜島おごじょ’の育成 (試験1)

選抜母集団として、鹿児島市桜島の3戸の生産者が自然受粉を行い採種した系統および数社の民間種苗会社が販売している品種、鹿児島市育成の F₁ 組み合わせ1系統を用いた。空洞症の少ない個体は、第1章第1節と同様な方法によって2段階で選抜した。

系統選抜における栽培は、各年9月下旬に当センター露地ほ場に、畝間100cm、株間100cmで1か所に3～5粒播種し、第5本葉展開時に間引きを行って1本仕立てとした。施肥は基肥のみで、N、P₂O₅、K₂Oをそれぞれ1.0kg・a⁻¹施用し、供試株数は系統当たり10株とした。収穫期に肥大根部特性を調査して個体選抜を行った。

選抜個体は、葉部を5cm程度に切り揃えてコンテナに移植し、無加温ガラス温室内で低温に感応させて抽苔を促進した。4～5月の開花期には自家不和合性を打破するために、蕾受粉を行って自殖種子を採種した。以上の行程を、2006～2009年の間に5世代繰り返して、F₁ 品種の親となる自殖系統を作出した。

F₁ の作出は2008年5月に無加温ガラス温室内で、自殖系統間の開花済みの花を用いて人工交配を行った。F₁ 組み合わせ能力検定は当センター露地ほ場で、現地栽培適応性検定は桜島地域の露地ほ場で実施した。

(2) ‘桜島おごじょ’と自然受粉品種4種との特性比較 (試験2)

試験は当センター内の露地ほ場(多腐植質黒ボク土壌)で2017年に栽培試験を実施した。前作跡地土壌養分の影響を小さくするために、供試ほ場の前作にソルガムを作付けし(2017年4～7月)、播種約3か月後にほ場から持ち出した。作付け前の土壌の化学性はpH(H₂O)が6.2、ECが0.02dS・m⁻¹、硝酸態窒素含量が0.53mg・100g⁻¹およびアンモニア態窒素含量が検出限界を下回った。

供試品種は、当センター育成F₁品種‘桜島おごじょ’、1993年に桜島町の農家が自然受粉によって採種した在来品種‘桜島’、市販されている自然受粉品種‘桜島大丸’(タキイ種苗株式会社)および自然受粉品種‘桜島大根’(株式会社トーホク)とした。畝間は120cm、株間70cmの白色マルチ栽培とし、2017年9月19日に1か所につき5粒播種し、10月4日(播種15日後)に3株に間引き、10月20日(播種31日後)に1株に間引きした。

施肥は基肥でリン酸を0.7kg・a⁻¹およびホウ素36g・a⁻¹をほ場全体に全層施用した。追肥として、10月4日(播種15日後)に株と株の間に直径約15cm、深さ約5cm程度の穴を開け、窒素、カリをそれぞれ0.35kg・a⁻¹、10月23日(播種34日後)に同じ場所に、窒素、カリをそれぞれ0.35kg・a⁻¹、11月7日(播種49日後)に窒素、リン酸、カリをそれぞれ0.8kg・a⁻¹局所施用した。1区40株の2反復とした。収穫は、2018年1月18日(播種121日後)に実施し1区15株調査し、葉重および肥大根重は試験1と同様に調査を行い、空洞症は目視にて有無を調査した。T-R率、空洞症およびす入り発生株率はアークサイン変換後統計処理を行った。

(3) ‘桜島おごじょ’と両親系統2種との比較 (試験3)

試験は当センター露地ほ場(多腐植質黒ボク土壌)で実施した。供試品種・系統は、当センター育成F₁品種‘桜島おごじょ’、両親系統の‘か系1号’および‘か

系2号’とした。畝間は120 cm，株間70 cmの白色マルチ栽培とし，2018年9月5日に1か所につき5粒播種し，9月27日に3株に間引き，10月4日に1株に間引きした。施肥は試験2と同様に実施した。1区5株の反復なしとし，10月9日，11月14日，11月22日，12月1日，12月12日，12月22日，1月3日，1月16日，1月26日に葉重および肥大根重および肥大根形の解析について試験1と同様な方法で行った。

3 結果および考察

(1) F₁ ‘桜島おごじょ’ の育成経過

図10に育成経過を示す。2006年9月に当センター露地ほ場で約700個体を養成し，肥大根の形状が優れ，空洞症の発生が少ない66個体を選抜し，蕾受粉によって自殖し，2007年5月にS_i種子を得た。9月にS_i世代60系統およびF₂世代4系統を播種し，す入りや空洞症が発生せず，肉質が硬いと判断した12系統を選抜した。

以後，自殖によって系統選抜を進め，2010年2月に空洞症の発生が少なく，す入りの遅い根部特性が揃っているS₆世代4系統（‘か系1号’，‘か系3号’～‘か系5号’）を得た。さらに，2007年から鹿児島市の育成したF₁系統5株を無選抜で自殖採種を行い，2008年9月にF₂世代5系統を播種し，す入りや空洞症が発生しなかった1系統を選抜し，以後自殖によって系統選抜を進め，2010年2月に空洞症およびす入りの発生が少ないF₅世代1系統‘か系2号’を得た。

次に，これら5系統を用い，交雑和合性が認められる15組み合わせのF₁を作出し，2011年からF₁組み合わせ能力検定を行い，す入りおよび空洞症の発生が少なく，揃いが良い有望な5組み合わせを選抜し，系統名を‘鹿児島1号’～‘鹿児島5号’と付与した。それら系統について，2012年～2015年の現地適応性検定の結果，母本を‘か系2号’，父本を‘か系1号’としたF₁系統‘鹿児島5号’が最も有望であった。さらに‘鹿児島5号’の現地適応性検定を継続し，2016年6月に品種登録出願し，2019年1月に‘桜島おごじょ’の名称で品種登録された（品種登録出願31019号）。

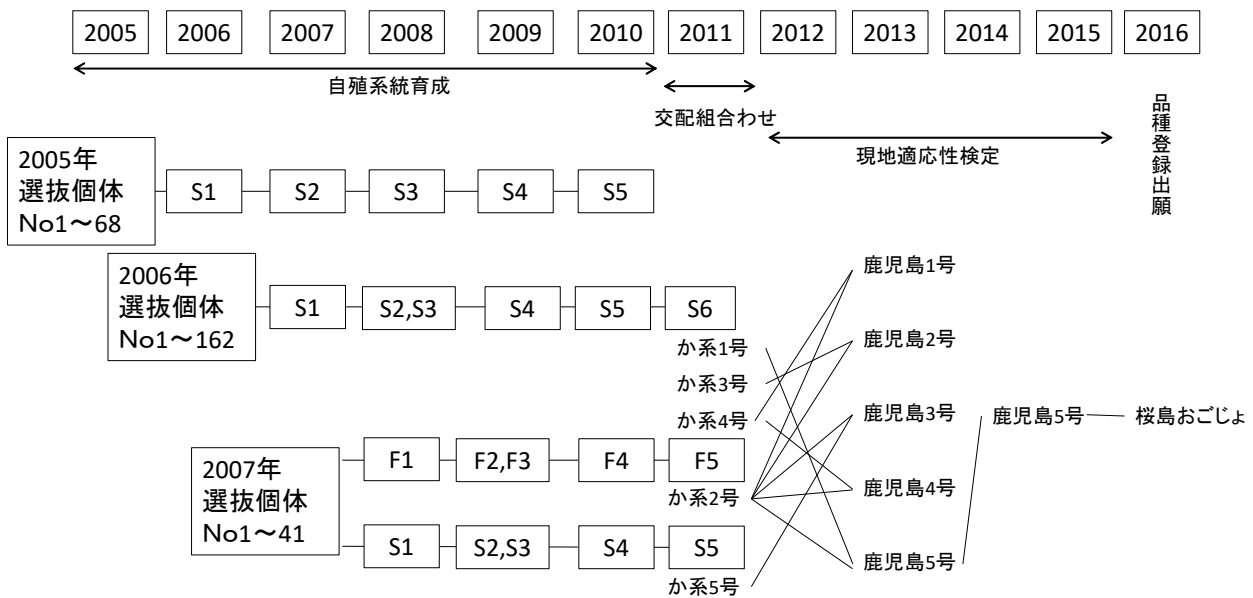


図10 ‘桜島おごじょ’ の育成経過

表 10 ‘桜島おごじょ’の主要特性

品種区分	育成元	品種名	固定または F ₁ 品種	葉色	葉重 (kg)	葉数 (枚)	小葉数 (枚)	肥大 根重 (kg)	T-R ²⁾ 率 (%)	肥大 根長 (cm)	抽根長 (cm)	肥大 根径 (cm)	糖度 (%)	水分率 (%)
育成品種	鹿児島県	桜島おごじょ	F ₁	濃緑	2.19 b	68 c	37.5 a	7.97 a	27 b	23.6 a	2.7 ab	27.8 a	5.69 a	94.8 a
市販品種	トーホク種苗	桜島大根	op ¹⁾	濃緑	2.84 a	101 a	35.1 a	6.71 b	42 a	20.0 b	1.8 b	26.2 bc	5.47 a	94.1 b
市販品種	タキイ種苗	桜島大丸	op	濃緑	2.72 a	81 bc	35.2 a	7.51 a	36 a	23.0 a	2.2 b	27.8 ac	5.51 a	94.3 ab
在来品種	マツヲ種苗	桜島	op	濃緑	2.29 b	85 b	36.5 a	5.86 c	39 a	20.8 b	3.5 a	25.1 b	5.50 a	93.9 b

品種名	固定または F ₁ 品種	総収量 (kg/10a)	商品収量 (kg/10a)	商品率 (%)	空洞症発生株率 1月19日 (%)	すいり発生株率 (%)	
						1月19日	2月20日
桜島おごじょ	F ₁	9,492 a	9,160 a	96.5 a	3.3 c	0.0 a	45.0 a
桜島大根	op	7,983 ab	1,597 b	20.0 b	23.3 b	70.0 b	100.0 b
桜島大丸	op	9,114 ab	1,823 b	20.0 b	26.7 b	66.7 b	100.0 b
桜島	op	6,979 b	2,338 b	33.5 b	43.3 a	30.0 b	90.0 b

注 1) 自然受粉品種を示す

注 2) 葉重/肥大根重×100

注 3) 異なるアルファベットは Tukey 検定によって 5%水準で処理区間に有意差あり

注 4) T-R 率, 水分率, 商品率, 発生株率はアークサイン変換後統計処理実施



図 11 市販品種と比べた‘桜島おごじょ’の内部品質

注 1) 下から‘桜島おごじょ’, ‘桜島大根 (トーホク種苗)’, ‘桜島大丸 (タキイ種苗)’, ‘桜島 (マツヲ種苗)’

注 2) パー 20 cm 間隔

(2) ‘桜島おごじょ’ と自然受粉品種3種の比較

表10および図11に民間種苗会社の自然受粉3品種と比べた‘桜島おごじょ’の主要特性を示す。葉重は、‘桜島おごじょ’が‘桜島大根(トーホク種苗)’および‘桜島大丸(タキイ種苗)’に比べて軽く、‘桜島(マツヲ種苗)’と同程度であった。葉数は、‘桜島おごじょ’が他に比べて少なかった。小葉数はいずれの品種も35枚程度と大きな違いは認められなかった。

肥大根重は5.86～7.97 kgで‘桜島おごじょ’が7.97 kgと‘桜島大丸’と同等で重かった。肥大根長は、‘桜島おごじょ’および‘桜島大丸’が長かった。抽根長は1.8～3.5 cmといずれの品種も抽根は短かった。最大根径は肥大根重および肥大根長と同様な傾向で‘桜島おごじょ’および‘桜島大丸’が長かった。肥大根の糖度は品種で大きな差はなかった。水分率は‘桜島おごじょ’が94.8%と他品種に比べてやや多かったが大きな差ではなかった。

総収量は、肥大根重の重かった‘桜島おごじょ’および‘桜島大丸’が多かったが、商品収量は‘桜島おごじょ’が他品種に比べて多く、商品率96.5%であった。

‘桜島おごじょ’は他3品種に比べて空洞症発生株率が3.3%と少なく、1月下旬収穫時点では、す入り発生は認められなかった。その後、2月下旬です入りの発生が認められ、他3品種に比べて1か月程度発生が遅かった。図12に肥大根重の箱ひげ図を示す。‘桜島おごじょ’は他3品種に比べて最大値および最小値の幅が小さく、肥大根重の均一性が高かった。

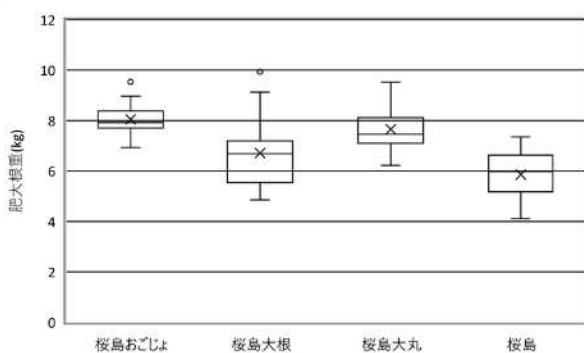


図12 肥大根重の箱ひげ図

(3) ‘桜島おごじょ’, 両親系統との比較

表11に‘桜島おごじょ’とその両親系統の形質の違いを示す。肥大根重は‘桜島おごじょ’が両親系統に比べて重く、ヘテロシスを示した。肥大根形は‘か系1号’が縦長で先細りの逆円錐形、‘か系2号’が扁球であった。‘桜島おごじょ’は、やや先細りの扁球であった。

空洞症は‘か系1号’の発生がみられず、‘か系2号’が80%、‘桜島おごじょ’は100%とすべての株で発生が認められた。す入りは、‘か系2号’および‘桜島おごじょ’で発生がみられず、‘か系1号’はすべての株で発生がみられた。水分率に大きな差は認められなかった。

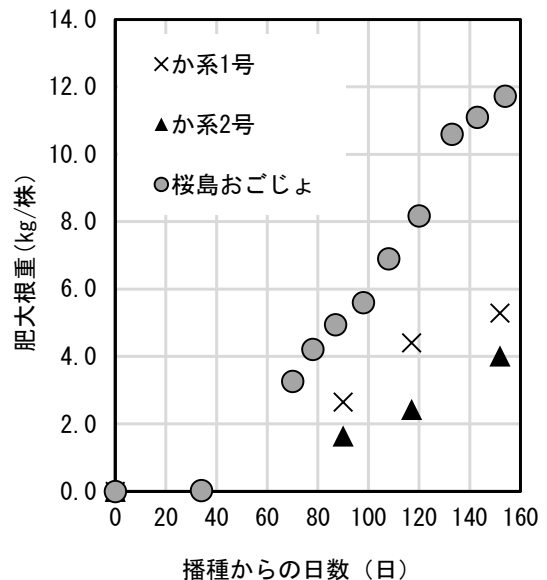


図13 ‘桜島おごじょ’およびその両親系統の肥大根重と播種からの日数との関係

図13に‘桜島おごじょ’およびその両親系統の肥大根重と播種からの日数との関係を示す。‘桜島おごじょ’は両親系統‘か系1号’および‘か系2号’に比べて肥大根重が重く、播種から100日後で6 kg程度、150日後で12 kg程度と両親系統の約2倍重かった。両親系統では、‘か系1号’が‘か系2号’に比べて肥大性が優れた。

SHAPEプログラムに基づき抽出された肥大根形の対称変異の主成分分析結果およびPC1およびPC2に抽出された根形の変異を図14に示す。PC1の寄与率は93.9%と極めて高く、PC2は3.2%と、PC1およびPC2で対称変異における情報量の97.2%が要約された。また、これらの輪郭は、対応する主成分得点を平均(0)±2×標準偏差に他の主成分得点を0とし、主成分得点から逆フーリエ変換によって再構築した図である。

この図から、各主成分が要約した情報を視覚的に解釈できる。PC1は主に根径/根長比の指標、PC2は主に肩張りの変形程度の指標になると考えられた。すなわち、PC1は値が大きいほど肥大根径に対し肥大根長が長く縦長、逆に値が小さいほど扁球を示した。

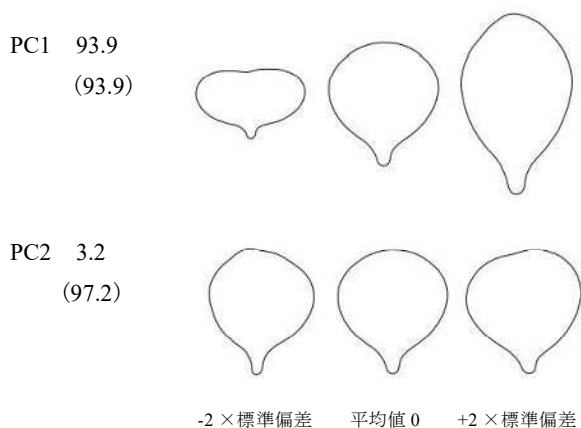


図 14 収穫時期別の‘桜島おごじょ’および両親系統における SHAPE による肥大根形の主成分分析結果および抽出された主成分別の肥大根形変異

注 1) 各輪郭は、対応する主成分得点を平均 (0) ± 2 × 標準偏差に、他の主成分得点を 0 とし、主成分得点から逆フーリエ変換によって再現した図

注 2) 図中の数値は寄与率, () 内は累積寄与率を示す

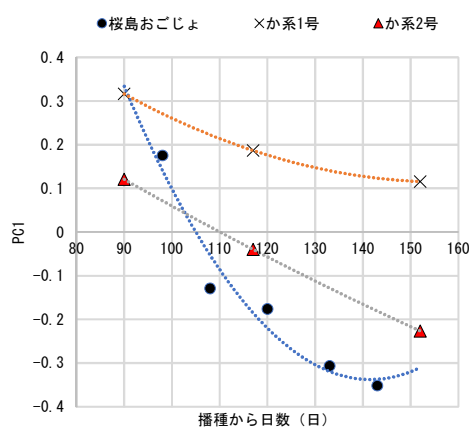


図 15 ‘桜島おごじょ’およびその親系統における播種からの日数が肥大根形に及ぼす影響

表 11 ‘桜島おごじょ’とその両親系統との形質の違い

品種・系統名	葉重 (kg)	肥大根重 (kg)	T-R率	空洞症発生株率 (%)	空洞面積率 (%)	す入り発生株率 (%)	柔細胞径 (μm)	水分率 (%)
か系1号	2.16 b	4.25 b	0.51 b	0 b	0 b	100 a	273 a	93.9 a
か系2号	2.26 b	3.21 b	0.80 b	80 a	12 a	0 b	180 b	93.5 a
桜島おごじょ	2.89 b	6.35 a	0.46 b	100 a	24 a	0 b	227 a	93.9 a

注 1) 異なるアルファベットは Tukey 検定によって 5%水準で処理区間に有意差あり

注 2) 発生株率および空洞面積率はアークサイン変換後統計処理を実施

図 15 に ‘桜島おごじょ’ およびその両親系統における播種からの日数と肥大根形の関係を示す。いずれの品種・系統ともに播種からの日数が多いほど扁球になる傾向にあった。肥大根形では、‘か系 1 号’は ‘桜島おごじょ’ および ‘か系 2 号’ に比べて縦長で、‘桜島おごじょ’ が最も扁球であった。

育成した F_i 品種 ‘桜島おごじょ’ は、従来の農家在来および民間の自然受粉品種に比べて、総収量は同等以上で空洞症およびす入りの発生が少なく商品率が高く、肥大根重の均一性も高かった。す入りにおいては、他品種に比べて 1 か月程度発生時期が遅かった。そのため収穫適期の幅が広がり収穫労力を分散させることができると考えられた。‘桜島おごじょ’ は、空洞症が発生しにくい ‘か系 1 号’ とす入りが発生しにくい ‘か系 2 号’ を両親系統とした F_i 品種である。また、‘か系 2 号’ の肥大は ‘か系 1 号’ に比べて遅く、最終収穫時の肥大根において柔細胞が他に比べて小さかった。このことから、

萩屋⁹⁾の報告と同様に、肥大の早晚および柔細胞の大きがす入りの発生の早晚 (難易) に関係していると考えられた。

第 1 章第 1 節において、桜島大根の空洞症発生に関する遺伝要因において、その優性遺伝子は空洞の少ない方向に作用するため、F_i 育種において片親に空洞症の発生が少ない系統を用いることが空洞症の発生しにくい F_i 品種育成に有効であると考察した。片親に空洞症が発生しにくい ‘か系 1 号’ を用いた F_i 品種 ‘桜島おごじょ’ が、他の自然受粉品種に比べて空洞症が発生しにくい特性を示したことから、空洞症の遺伝性について確認できた。さらに、空洞症発生の環境要因については第 3 章の第 1 節および第 2 節で詳しく述べる。また、肥大根の形態においても桜島大根の典型的な形である扁球はヘテロシスの影響を受けると考察した⁶⁾。‘桜島おごじょ’ は、両親系統に比べて扁球であり、生育日数が長いほど扁球の程度が強かった。これらのことから、ヘテロシス

が生育量を増加させ、扁球の程度を強めると推察された。以上のことから、桜島大根の F₁ 化は、肥大根重および形をこれまでのイメージのままに、空洞症およびす入りが発生しにくいという品質向上に高い効果を示した。

さらに、栽培場面におけるメリットとして、桜島大根に特有な経験則に基づいた間引き作業¹²⁾の効率化が考えられる。具体的には、1か所に30粒程度播種し、その後数回に分けて胚軸の長さ、色および葉の形などを指標として優良な1個体を残すというものである。この作業はバラツキのある集団から優良個体を選抜する作業も兼ねている。遺伝的に均一な F₁ 品種は、この選抜が不要となり、間引き作業の省力だけでなく、経験不足をカバーする一助となるであろう。今後、本品種を用いることで高品質生産が可能となるであろう。

第2節 F₁ 純度検定可能な DNA マーカーの開発

1 緒言

本研究で育成した F₁ 品種‘桜島おごじょ’の採種は、親系統の自家不和合性の利用を想定している。この採種法は、ダイコンをはじめとする多くのアブラナ科野菜において一般的な技術となっている。しかし、親系統の自家不和合性が弱い場合、自殖種子あるいは同一系統内交配種子が混入し、採種種子内の F₁ 種子の割合（以下、F₁ 純度）が低下することも知られている⁴¹⁾。アブラナ科野菜の F₁ 種子の純度検定用ツールとして、アイソザイム多型³¹⁾および自家不和合性に関与する S 遺伝子座（S-locus glycoprotein）の DNA 配列を用いた多型解析から異型接合性を判別する PCR-RFLP 法が開発されている⁴²⁾⁴⁴⁾。しかし、アイソザイムを用いる方法は多型性の程度において DNA マーカーには及ばない。一方、PCR-RFLP 法も PCR 産物を制限酵素処理する必要があり、一連の操作が煩雑で手間がかかる。

近年、穀物のみならず野菜の育種現場においても DNA マーカーが活用され始めている⁵¹⁾。実用化されている DNA マーカーのうち、PCR 産物を制限酵素処理することなく使用できるマイクロサテライトマーカーは、簡便性に加え、多型検出能と再現性の高さから、F₁ 種子の純度検定、品種識別やマーカー利用選抜に利用されている。特に、メロン⁶⁾やネギ⁶⁵⁾では、育種の様々な過程でマイクロサテライトマーカーが利用されている。また、アブラナ科野菜では、ハクサイ (*Brassica rapa* L.) において多数のマイクロサテライトマーカーが開発され、遺伝・育種研究に利用されており⁵³⁾、その一部は属を超えて利用できるためダイコン連鎖地図の作製に用いられた⁶⁶⁾。この事例は、我が国に多く存在する在来品種の解析

に異属で使われる DNA マーカーが適用できる可能性を示している。

そこで、本研究では、桜島大根における系統間多型の解析、個々の系統内における多型検出頻度の調査および F₁ 種子の純度検定を行うため、同じアブラナ科のハクサイ (*B.rapa*) のマイクロサテライト増幅用プライマーの利用を試みた。

2 材料および方法

(1) 桜島大根における *Brassica rapa* のマイクロサテライトプライマーの多型分析への適用（実験 1）

供試系統として、1995～2005年までの間に鹿児島大学と鹿児島市の共同研究によって育成された両親系統 A、B およびその F₁（以下 KC-F₁）を用いた。両親系統は、桜島大根の農家自家採種系統から個体選抜後、自殖を6回繰り返した固定系統である。F₁ 種子を得るために、網室ハウス内で開花前日に除雄した小花を用いて人工交配した。DNA マーカーの解析には、A 系統を6個体、B 系統を3個体および、KC-F₁ を2個体それぞれ供試した（表12）。DNA 抽出は、本葉から採取した約100mgの組織片を用いて DNeasy Plant Mini Kit（キアゲン）を使用して行った。

本研究では、*B.rapa* のマイクロサテライト隣接部位にアニールするように設計された300種類のプライマー対である BRMS シリーズの蛍光標識プライマー96種類および未標識プライマー204種類⁵³⁾⁵⁴⁾⁵⁵⁾を用いた。

PCR 溶液は鋳型 DNA 1 L (DNA 量 5～50 ng), ExTaq ポリメラーゼ (Takara) 0.25 U, 添付 dNTPs 0.8 μL, 添付バッファー 1 μL, プライマー各 4 pmol を滅菌水で 10 L となるように調整した。PCR 反応は Gene Amp PCR System9700 (Applied Biosystems) を用いて行った。PCR サイクルの条件は次の通りである。まず、94℃・2分間の予備変性の後、【94℃・1分間（変性反応）、50℃・1分間（アニール反応）、72℃・1分間（伸長反応）】を1サイクルとして35サイクル繰り返し、最後に72℃・4分間の伸長終了反応を行った⁶⁶⁾。得られた PCR 増幅産物は、2.5%アガロースゲル電気泳動によって増幅を確認した後、分子サイズを詳細に調べるために ABI3730 ジェネティックアナライザーでキャピラリー電気泳動し、同時に Gene Mapper ver3.0 によるフラグメント解析を行った。未標識プライマー対によって得られた PCR 産物は R110-ddUTP (Perkin-Elmer) でラベルし、上記フラグメント解析を行った³⁴⁾。

(2) *Brassica rapa* 由来のマイクロサテライトプライマーを用いた桜島大根自然受粉品種の DNA 多型解析

(実験 2)

植物材料には、市販の 8 品種および鹿児島市農家 X ならびに Y が採種した在来の自然受粉品種を用いた (表 12)。マイクロサテライト多型を検出するためのフラグメント解析には、それぞれの品種について 4 個体ずつ、合計 40 個体を供試した。供試したマイクロサテライトプライマーとしては、実験 1 において系統間多型が認められ、アガロース電気泳動で増幅バンドがより明確であった *B.rapa* の 6 種を用いた。各プライマー対を用いた PCR から得られた DNA 多型の出現様相を評価するために、それぞれのフラグメントを対立遺伝子として取り扱って多型情報含有値 (polymorphism formation content ; 以下, PIC) を算出した。PIC は、以下の式¹⁾に従い各マーカー座について値を求めた。

$$PIC=1-\sum_{i=1}^k p_i^2$$

数式中の k は各マーカー座における対立遺伝子の数を、 P_i は i 番目の対立遺伝子頻度を表す。

表 12 本研究で用いた品種・系統の由来、採種法および供試個体数

試験	品種名・系統	採種法	育成機関	供試個体数 (株)
実験1	KC-F ₁	F ₁	鹿児島市	2
	A系統	S ₆	鹿児島大学・鹿児島市	6
	B系統	S ₆	鹿児島大学・鹿児島市	3
実験2	晩生桜島	op ¹⁾	アサヒ農園	4
	晩生桜島	op	カネコ種苗	4
	晩生桜島	op	小林種苗	4
	晩生桜島	op	タカヤマシード	4
	桜島大丸	op	タキイ種苗	4
	晩生桜島	op	野口種苗研究所	4
	晩生桜島	op	福種	4
	晩生桜島	op	丸種	4
	晩生桜島	op	農家X	4
	晩生桜島	op	農家Y	4
実験3	C系統	F ₅	鹿児島県	10
	D系統	S ₆	鹿児島県	8
	E系統	S ₆	鹿児島県	12
	F系統	S ₆	鹿児島県	23
	C×D	F ₁	鹿児島県	15
	C×E	F ₁	鹿児島県	16
	C×F	F ₁	鹿児島県	16

注 1) 自然受粉品種を示す

(3) 鹿児島県育成の自殖系統におけるマーカー座の固定度および F₁ 種子の純度検定 (実験 3)

供試系統として、組合せ能力検定で見いだした次の 7 種を用いた。最初の 4 種類は F₁ の両親として有望と見なされた自殖系統 (C, D, E および F) であり、残りの 3 種類は自殖系統の交雑によって得られた F₁ 組み合わせ (C×D, C×E および C×F) である。なお、C 系統は鹿児島市育成 F₁ 組合せ KC-F₁ の自殖第 5 代であり、4 種類の系統中で最も自家不和合性の強い系統である (データ略)。D, E および F 系統は農家で自家採種した集団から選抜した系統の自殖第 6 代である。また、C×F の組み合わせが本研究で育成した '桜島おごじょ' である。F₁ 採種のための交配は、開花当日の小花を利用し、C 系統は自家不和合性が強いことを確認していたため除雄なしの人工受粉で行った。

PCR の鑄型に用いる DNA 抽出は、バレイシヨ 1 分間抽出法¹⁷⁾を一部改変した手法によって約 50mg の本葉を用いて行った。PCR のプライマーは実験 1 で DNA 多型が認められたものの中からアガロースゲルにてフラグメント解析ができた 2 種類 (BRMS-005,-033) を用いた。

PCR 溶液は、濃度調整を行っていない鑄型 DNA 1 μL, ExTaq ポリメラーゼ (Takara) 0.25 U, dNTPs 0.8 μL, 10 × PCR バッファー 1 μL および各プライマー溶解液 (2 pmol) を混合し、それを滅菌水で 10 μL に容量調整したものをを用いた。PCR サイクルの条件は次の通りである。まず、94 °C・3 分間の予備変性の後、【94 °C・30 秒間 (変性反応), 60 °C・30 秒間 (アニール反応), 72 °C・30 秒間 (伸長反応)】を 1 サイクルとして 35 サイクルを繰り返す、最後に 75 °C・7 分間の伸長終了反応を行った。得られた PCR 産物を 4 %アガロースゲル電気泳動によって DNA 断片として分離した。ここでは、PCR 産物を明確に分離するために実験 1 に比べて高濃度の 4 %アガロースゲルを用いた。

3 結果および考察

(1) *Brassica rapa* のマイクロサテライトプライマーの桜島大根の多型分析への適用 (実験 1)

300 種類の *B.rapa* 由来のマイクロサテライトマーカーを用いて桜島大根における DNA 増幅を確認したところ、150 種類において比較的明瞭なフラグメントが検出され、そのうちの 8 種類で A と B 系統間の多型が検出された。次に、上記の 8 種類のプライマー対を用いて 'KC-F₁' の分析を行ったところ、すべての対において両親由来のフラグメントを併せ持つマーカープロファイルが得られた (表 13)。従って、得られた 8 種類の DNA フ

ラグメントは核ゲノムに由来し、次代に遺伝することが確認された。また、それぞれのラグメントは、*B.rapa*のものとは異なる増幅断片サイズであった。さらに、BRMS-005と-033で得られたマーカーは2.5%アガロースゲルを用いた電気泳動で明瞭に確認できる簡便性を兼ね備えていた。

従来のS遺伝子座における多型解析手法(PCR-RFLP法)と比べ、これら2種類のプライマー対を用いた多型解析は、検出手順がよりシンプルであるだけでなく、コストの大幅な低減も期待できる。

属間増幅の利用例として、*B.rapa*のマイクロサテライトプライマーを用いて得られたDNAマーカーによるダイコン連鎖地図作成の報告がある⁶⁶⁾。Tsuruら⁶⁶⁾は、60種類のプライマー対からダイコンで、系統間多型を生じる23種類のプライマー対を見つけた。さらに、これらを用いて、中国品種‘黄河紅丸’と日本品種‘源助大根’

の交雑によって得られた分離世代による遺伝分析が行われ、19種類のDNAマーカーが連鎖地図上に位置づけられた。この他、マメ科植物においても属間増幅多型の利用に関する報告がある。この研究では、66種のヒラマメ属とインゲンマメ属のマイクロサテライトマーカーを用いてキマメ属の24品種に対して解析を行い、12種のマーカーを見つけたと報告している⁴⁾。

本研究では、300種類のプライマー対を用い、桜島大根品種・系統の遺伝分析に利用可能な8種類のDNAマーカーを得ることができた。多数のプライマー対を使用したにも関わらず、得られたマーカー数が前例より少なかった理由として、本研究においては未標識マーカーを多数利用したこと、および桜島大根の遺伝的多様性が、中国大根や日本大根の品種間の遺伝的多様性と比較して小さいことに由来すると推察された。

表13 AとB系統を用いた予備選抜で系統間多型が認められた*B.rapa*由来マイクロサテライトプライマー対の塩基配列と増幅断片サイズ

BRMS-No.	プライマー対 塩基配列 (5' から3')	増幅断片サイズ (bp) ³⁾			
		桜島大根			<i>B. rapa</i>
		A	B	KC-F ₁	
BRMS-005 ¹⁾	ACCTCCTGCAGATTCGTGTC ²⁾ GCTGACCTTTCTTACCGCTC	134	160	134/160	162
BRMS-033 ¹⁾	GCGGAAACGAACACTCCTCCCATGT ²⁾ CCTCCTTGCTTTCCTGGAGACG	288	218	288/218	223 233
BRMS-051 ¹⁾	GGCCAAGCCACTACTGCTCAGA ²⁾ GCGGAGAGTGAGGGAGTTATGG	259	251	259/251	262
BRMS-060	AGCCACAGACCTGAATGTTTTGCG ²⁾ TTCCCTCGATCAGCTTCTGCAACTC	262	252	262/252	269 277
BRMS-083	GATCTTGGCCGGTACTCTCTCTCTC CTTGGGGCATGTGTTGGTCTTATGA	147 355	147 344	147 355/344	増幅無し
BRMS-120	GTCAGCATAACGGCAAAACTCGCA ²⁾ GGTACGGCAGTTCTCGGTCGGTTAA	276	284	276/284	267 270 329
BRMS-161	ACCTGTTCATAGCTCCTGTCTATAATC TTAACAGCCCTGGTAGTTCTGACT	223	240	223/240	増幅無し
BRMS-175	GTGATACTGAAAGGGAGAGAGTGAG ²⁾ AATCCTCATGAGCAAATCAACTAAC	234 262	234 253	234 262/253	233

注1) Suwabeら⁵³⁾によって公表済み

注2) VegMarksで公表済み <http://vegmarks.nivot.affrc.go.jp/VegMarks/jsp/index.jsp>

注3) 増幅断片長はGeneMapper解析値であり、実際の増幅断片長とは異なる場合がある

表 14 マイクロサテライトマーカーの桜島大根品種における増幅断片長と多型指数

マーカー名	BRMS-005	BRMS-033	BRMS-060	BRMS-120	BRMS-161	BRMS-175
品種・系統の育成元						
アサヒ農園	134, 143, 160 ¹⁾	218	253	277	214, 223, 240	234, 253, 259, 273
カネコ種苗	143, 160	218	253, 259, 262, 268	277	214, 223, 240	234, 253, 256, 273
小林種苗	134, 143, 160	218, 288	253, 259	277	214, 240	234, 256, 259, 262, 273
タカヤマシード	134, 143, 160	218, 288	253, 262	277	234, 240	234, 253, 256, 259
タキイ種苗	134, 143	218, 288	253, 257, 259	277	234, 240	234, 253, 259
野口種苗研究所	134, 143	218, 288	253, 257, 259, 262	277, 283	234, 240	234, 253, 259, 262
福種	134, 143, 160	218, 288	253, 259	277, 283	214, 223, 234, 240	234, 253, 259, 262, 273
丸種	134, 143, 160	218, 288	253, 262	277	214, 240	234, 253, 256, 259, 277
農家 X	134	218, 288	253, 262	277, 283	214, 240	234, 253, 256, 259
農家 Y	134, 160	218, 288	253, 257, 259	277, 283	214, 234, 240	234, 253, 256, 259, 262
対立遺伝子数	3	2	5	2	4	7
PIC ²⁾	0.62	0.38	0.60	0.12	0.33	0.80

注 1) 値は増幅断片サイズ (bp) を示し、4 個体すべてではなく、1 個体でも検出されたものを記載した

注 2) 多型情報含有値を示す

(2) *Brassica rapa* のマイクロサテライトプライマーを用いた桜島大根自然受粉品種の DNA 多型解析 (実験 2)

桜島大根の自然受粉品種・系統における遺伝的多様性の程度を把握するために、予備選抜された 8 種類のうち 6 種類のマーカー座における多型性の度合を調査した結果、検出された対立遺伝子数は、2~7 (平均 3.8) となり、PIC は、0.12~0.80 (平均 0.48) となった (表 14)。これらの 2 つの観点から最大の多型性を示したプライマーは BRMS-175 であった。さらに、実験 1 の分析においても再現性の高かった BRMS-005 ならびに-060 も高い多型性がみられた。

従って、これら 3 種類のプライマー対によって得られる桜島大根の DNA マーカーは、系統間および系統内個体間における DNA 多型を検出できる可能性が高いと考えられた。今後、これら PIC 値の高いマーカーを増やすことで、F₁ 純度検定だけでなく、F₁ 品種間の識別、鹿児島市の在来自然受粉品種および民間種苗会社の自然受粉品種の識別ができる。

表 15 自殖および F₁ 組み合わせにおける各マイクロサテライトマーカー (対立遺伝子) の出現様相

系統名と由来	出現したマーカーの数						
	BRMS-005			BRMS-033			
	134 ¹⁾	160	134/160	218	288	218/288	
自殖系統	C系統	0	8	0	0	8	0
	D系統	0	11	0	3	3	6
	E系統	6	17	0	0	8	0
	F系統	0	8	0	8	0	0
F ₁	C×D	0	14	0	0	13	2
	C×E	0	11	5	0	14	0
	C×F	0	16	0	0	0	16

注 1) 各数字は増幅断片サイズ (bp) を示す

(3) 鹿児島県育成の自殖系統におけるマーカー座の固定度および F₁ 種子の純度検定 (実験 3)

プライマー対 BRMS-005 と-033 を用いて 4 種類の自殖系統および 3 組合せの交雑によって得られた F₁ 組合せの多型解析を行った結果を表 15 に示す。BRMS-005 を用いた場合、C、D および F 系統には 160 bp のバンドのみが検出され、E 系統では 134 bp の単一バンドが検出されたものが 6 個体、160 bp が検出されたものが 17 個体認められた。F₁ では C×D および C×F の組合せに、すべての個体で 160 bp のバンドのみが検出された。C×E の F₁ では、160 bp の単一バンドのみが検出されたものが 11 個体、134 と 160 bp の両方のバンドが検出されたものが 5 個体認められた。BRMS-033 を用いた場合は、C および E 系統には 288 bp、F 系統には 218 bp の単一バンドのみが検出されたが、D 系統には、218 bp と 288 bp のいずれかのバンドが検出されたものが各 3 個体、両方のバンドが検出されたものが 6 個体あった。F₁ についてみると、C×D は 288 bp の単一バンドのみが検出されたものが 13 個体、218 bp と 288 bp の両方が検出されたものが 2 個体認められ、C×E の F₁ では、すべての個体で 288 bp の単一バンドのみが認められた。その一方で、C×F では、供試した全個体 (16 個体) において 218 と 288 bp のバンドが検出された。

以上のことから、BRMS-033 座において、C と F 系統は種類の異なる対立遺伝子がホモ接合の状態保持されており、C×F の F₁ でみられたヘテロ接合性は両親由来の異なる対立遺伝子を併せ持っていると考えられた。従って、供試した F₁ 組合せの中で、直ちに種子純度検定に利用することができるのは C×F のみであると結論づけられた (図 16)。このことから育成した F₁ 品種

‘桜島おごじょ’はBRMS-033によってF₁純度検定が可能であることが明らかになった。なお、F₁には両親系統に由来する218 bpおよび288 bpのバンドに加えて、370 bp付近にバンドが認められた。シロイヌナズナのヘテロデュプレックス解析¹³⁾の方法を参考に、両親系統の鋳型DNAを1:1の割合で混合し、実験3と同様な解析を行った結果、370 bp付近にバンドが認められた。このことからF₁において検出された370 bp付近のバンドは、両親系統に由来するDNA断片のヘテロデュプレックスであると考えられた。

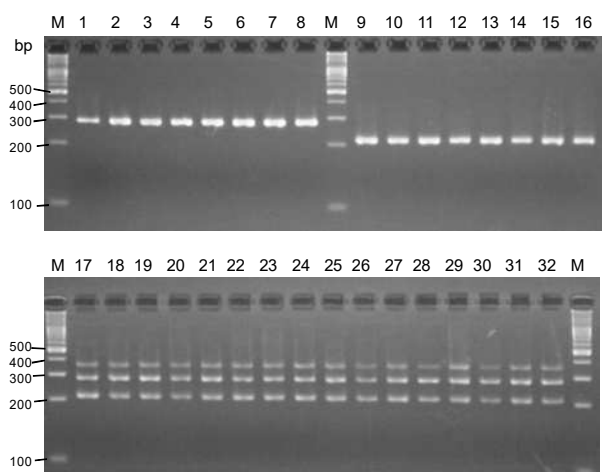


図16 BRMS-033 マーカー座における自殖系統間のDNA多型とF₁‘桜島おごじょ’(C×F)雑種性の確認

注1) レーン1～8 : C系統(か系1号)の8個体
 レーン9～16 : F系統(か系2号)の8個体
 レーン17～32 : F₁(C×F)の16個体

注2) M : 100 bp DNA ladder

第3章 F₁品種‘桜島おごじょ’に適する栽培技術

第1節 株間および施肥方法の違いが空洞症およびす入りの発生に及ぼす影響

1 緒言

本研究において、育成したF₁品種‘桜島おごじょ’は、当センター内における生産力検定試験では空洞症およびす入りの発生が少ない特徴を示したが、桜島での現地適応性試験では、生産者によって空洞症の発生が認められた。第1章で記述したように桜島大根における空洞症の発生には、遺伝要因だけでなく環境要因が関与することが示され、その要因としてはほ場の土壌理化学性および施肥方法などが考えられた⁵⁹⁾。桜島大根の施肥方法は、各生産者によって独自の方法で行われていることから詳細は不明であるが、基肥と数回に及ぶ追肥であることが知られている¹²⁾。ダイコンの空洞症の発生には品種間差

があり¹⁹⁾²⁹⁾、高地温²⁸⁾や窒素施用量、特に基肥および全体の施肥量が多い場合に発生が助長されること²¹⁾が報告されている。一方、ダイコンのす入りの発生には‘二十日大根’における播種期、株間、施肥など栽培環境の影響¹⁰⁾や‘和歌山大根’における施肥方法の影響⁴⁶⁾など、いくつかの報告がある。しかし、桜島大根についての知見はほとんどない。加えて、桜島大根は農家による自然受粉品種であり、遺伝的なバラツキが大きいいため、環境の影響を正確に分析するのは困難である。

そこで、本研究では遺伝的に均一性の高いF₁品種‘桜島おごじょ’とバラツキの大きい‘在来品種(桜島)’を用いて、環境要因、特に施肥方法および株間の違いが空洞症とす入りの発生に及ぼす影響について検討したので報告する。

2 材料および方法

実験は当センター露地ほ場(黒ボク土壌)で実施した。残肥の影響を小さくするために、供試ほ場の前作にソルガムを作付けし(2015年4～7月)、播種約3か月後にほ場から持ち出した。作付け前の土壌の化学性はpH(H₂O):6.4, EC:0.04 dS・m⁻¹, 硝酸態窒素1.0 mg・100 g⁻¹およびアンモニア態窒素0.05 mg・100 g⁻¹であった。供試品種は、当センター育成F₁品種‘桜島おごじょ’および1993年に桜島町の農家が自然受粉によって採種した‘在来品種(桜島)’とした。

空洞症に関する栽培試験は、畝間120 cmの白色マルチ栽培とし、2015年9月18日に1か所につき5粒播種し、10月5日(播種17日後)に3株に間引き、10月14日(播種25日後)に1株に間引きした。施肥方法については、ほ場全体に全層施用する基肥重点区および畝内に追肥によって局所的に施す追肥重点区の2つの処理区を設けた。さらに、各処理区とも株間を50および100 cmの2水準とし、各品種とも1区32.4 m²の4処理区を3反復で設定した。なお、調査株数は1区10株とした。基肥重点区は、基肥としてN, P₂O₅, K₂Oをそれぞれ1.5 kg・a⁻¹、また、微量元素の供給のため、同時にホウ素を36 g・a⁻¹、ほ場全体に全層施用し、追肥として11月30日および12月14日に畝間にN, K₂Oをそれぞれ0.88 kg・a⁻¹表層施用した。追肥重点区は、基肥としてP₂O₅を0.7 kg・a⁻¹およびホウ素36 g・a⁻¹をほ場全体に全層施用した。追肥として、10月5日(播種17日後)に播種穴から10 cm程度離れた東西2か所に直径約3 cm、深さ約5 cmの穴を開け、N, K₂Oをそれぞれ0.35 kg・a⁻¹、10月13日(播種24日後)に播種穴から南北位置に10月5日と同様な穴を開け、N, K₂Oをそれぞれ0.35 kg・a⁻¹、10

月 21 日（播種 33 日後）に株と株の間に直径約 15 cm, 深さ約 5 cm 程度の穴を開け, N, P₂O₅, K₂O をそれぞれ 0.8 kg・a⁻¹ 局所施用した（図 17）.

その後は, 基肥重点区と同様に 11 月 30 日（播種 73 日後）および 12 月 14 日（播種 87 日後）に畝間に N, K₂O をそれぞれ 0.44 kg・a⁻¹ 表層施用した. 合計の N, P₂O₅, K₂O は基肥重点区, 追肥重点区とも 1.94 kg・a⁻¹:1.5kg・a⁻¹:1.94 kg・a⁻¹ とした. 一方, す入りについては, 収穫始期である 2016 年 1 月 19 日および収穫後期である 2 月 10 日の 2 回収穫を行い, 1 区 10 株の反復なしとした.

収穫時では, 葉重は根を切断したすべての地上部の生体重を測定し, 肥大根重は根端部の直径が約 1 cm の部位で切り揃え, 側根を切除した生体重を測定した. 空洞発生度は, 第 1 章第 1 節の方法で算出した.

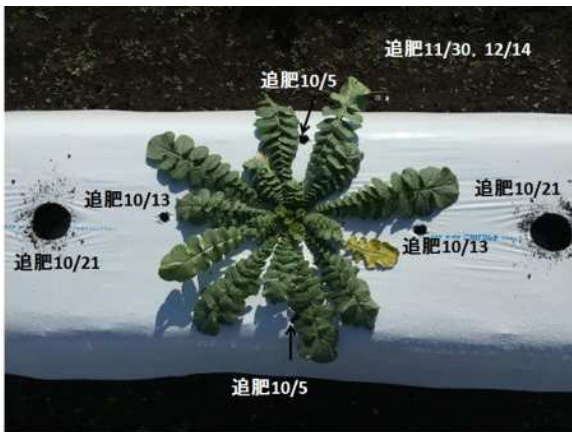


図 17 追肥重点区の施肥時期および位置
(2015 年 10 月 21 日)

す入り程度は, 0:認められない, 1:白濁色の部分が認められる, 2:断面積の 15%未満, 3:断面積の 15~25%, 4:断面積の 25%以上に認められるの 5 段階の指数で評価した. 肥大根の組織については, 正常な部位およびす入りの部位をメスで約 5×5 mm, 厚さ約 2 mm に切り出し, 走査型電子顕微鏡 (VE-8800, (株) キーエンス) で直接観察した. 植物体の無機元素は, 硫酸一過酸化水素水分解後, 希釈液を分析に供し, 全窒素は水蒸気蒸留法, リンはパナドモリブデン酸法, カリウム, カルシウム, マグネシウムは原子吸光光度計 (Analyst700, PerkinElmer, Inc.) で測定した.

3 結果および考察

(1) 空洞症および肥大根重

‘桜島おごじょ’および‘在来品種 (桜島)’における施肥方法と株間が収穫時の肥大根重や空洞発生度に及

ぼす影響について図 18 に示した. 肥大根重では, ‘桜島おごじょ’は施肥方法の違いで有意な差は認められなかったが, 株間は 100 cm 区が 50 cm 区に比べて 5%水準で有意に重かった. 一方, ‘在来品種 (桜島)’では追肥重点・株間 100 cm 区が最も重く, 5%水準で有意差が認められた. 空洞発生度は, 2 品種とも基肥重点・株間 100 cm 区が最も高く, 次いで基肥重点・株間 50 cm 区で, 追肥重点・株間 50 cm 区が最も低かった. ‘在来品種 (桜島)’の基肥重点・株間 100 cm 区では, 甚大な空洞症だけでなく, 変形した肥大根の発生も認められた (図 19).

空洞発生度と各形質の関係についてみると, 1 月 19 日収穫時の葉重とは R = 0.93 の高い正の相関が認められたが, 肥大根重との相関は認められなかった. また, 間引き終了時の直上投影葉面積および間引き終了時までの窒素施肥量と空洞発生度との間には各々, R = 0.89, R = 0.97 の高い正の相関が認められた (図 20). 2 月 10 日の収穫時に ‘桜島おごじょ’の追肥重点・株間 100 cm 区の代表的な個体の根域調査を行った結果では, 側根は長いもので 70 cm 以上に達しており (図 21), 局所施肥した穴の周辺には密集した根が観察された.

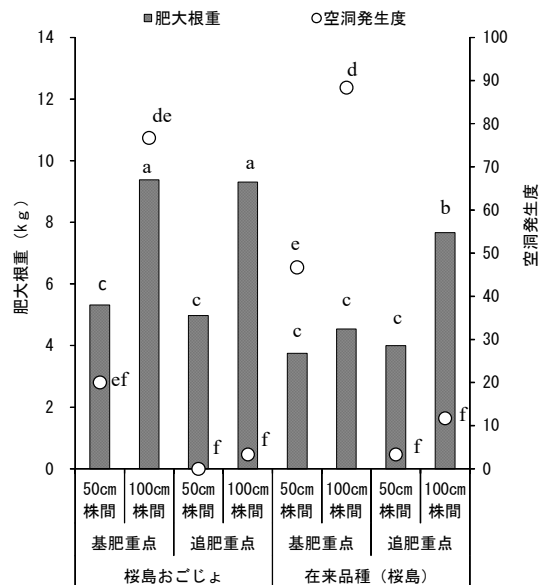


図 18 ‘桜島おごじょ’および‘在来品種 (桜島)’における施肥方法および株間が収穫時の肥大根重および空洞発生度に及ぼす影響 (収穫日: 2016 年 1 月 19 日)

注 1) 異なるアルファベットは Tukey 検定によって 5%水準で処理区の間有意差あり (肥大根重: a, b, c, 空洞発生度: d, e, F)



図19 ‘桜島おごじょ’および‘在来品種（桜島）’の株間100 cm区における施肥方法の違いが空洞症に及ぼす影響（2016年1月）

注1) 上段左：‘桜島おごじょ’基肥重点区，上段右：‘桜島おごじょ’追肥重点区
 下段左：‘在来品種（桜島）’基肥重点区，下段右：‘在来品種（桜島）’追肥重点区
 注2) バーは20 cmを示す

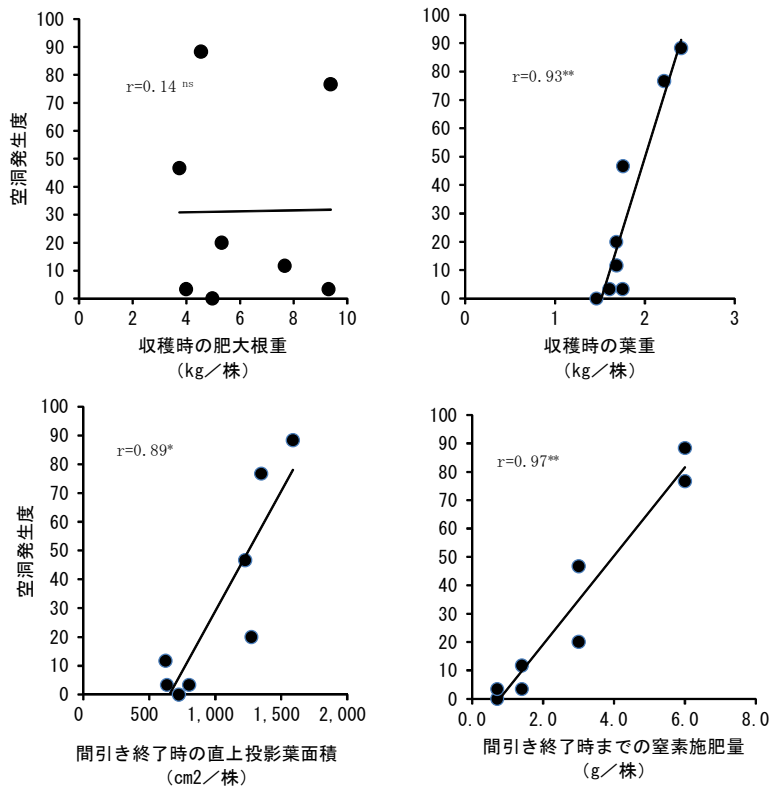


図20 収穫時の空洞発生度と収穫時（1月19日）の肥大根重（左上）葉重（右上），間引き終了時の直上投影葉面積（左下）および間引き終了時までの窒素施肥量（右下）との関係

注1) 無相関検定によって，**；1%有意差あり，*；5%有意差あり，ns；有意差なし

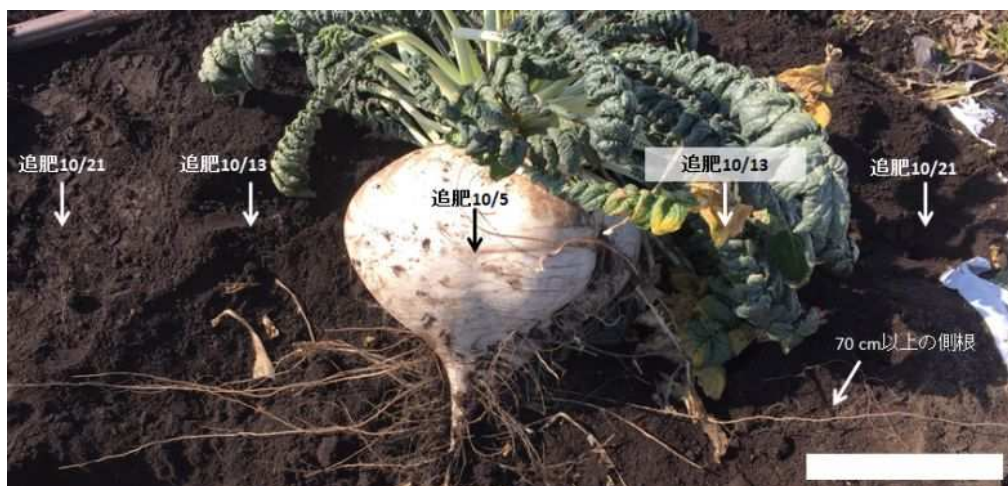


図 21 ‘桜島おごじょ’・追肥重点区の側根発生状況（2016年2月10日）

注 1) バーは 20 cm を示す

(2) す入り

表 16 に ‘桜島おごじょ’ および ‘在来品種（桜島）’ における施肥方法と株間の違いが肥大倍率や収穫時のす入り程度に及ぼす影響を示した。肥大倍率は、2 品種とも追肥重点・株間 100 cm 区が最も高かった。1 月 19 日収穫時のす入りは、‘桜島おごじょ’ ではいずれの区においても認められなかったが、‘在来品種（桜島）’ ではす入り程度 0.4 ~ 1.7 といずれの区においても発生が認められた。2 月 10 日の収穫時では ‘桜島おごじょ’ の基肥重点区はす入りの発生が認められなかったが、追肥重点区は発生が認められ、追肥重点・株間 100 cm 区のす入り程度が 1.2 と最も大きかった。一方、‘在来品種（桜島）’ では、1 月 19 日の収穫時と同様に、いずれの区でも発生が認められ、す入り程度は追肥重点・株間 50 cm 区が 2.8 と最も大きかった。

図 22 に ‘桜島おごじょ’ における肥大根柔組織の正常な組織およびす入りの組織断面の走査型電子顕微鏡写真を示した。正常な組織では、肥大根柔細胞内に水分が充填されているのに対し、す入りの組織では肥大根柔細胞内に気泡および破生間隙が観察された。

表 16 ‘桜島おごじょ’ および ‘在来品種（桜島）’ における施肥方法および株間の違いが肥大倍率およびす入り程度に及ぼす影響

品種	施肥方法	株間 (cm)	肥大倍率 ²⁾ (倍)	す入り程度 ¹⁾	
				1月	2月
桜島おごじょ	基肥重点	50	670 c ³⁾	0.0 a	0.0 a
		100	1,183 b	0.0 a	0.0 a
	追肥重点	50	1,220 b	0.0 a	0.6 a
		100	2,135 a	0.0 a	1.2 a
在来品種(桜島)	基肥重点	50	617 c	0.4 b	0.2 b
		100	872 bc	0.4 b	0.4 b
	追肥重点	50	1,381 b	1.0 ab	2.8 a
		100	2,853 a	1.7 a	1.2 ab
分散分析 ⁴⁾		品種	ns	**	**
		施肥	**	*	*
		株間	**	ns	ns

注 1) す入り程度

0：す入りが認められない，1：す入りの初期段階である白濁色の部分が認められる，2：断面積の 15 %未満にす入りが認められる，3：断面積の 15 ~ 25 %にす入りが認められる，4：断面積の 25 %以上にす入りが認められる

注 2) 肥大倍率=収穫時の肥大根重 (2016年1月19日) / 間引き時肥大根重 (2015年10月14日)

注 3) 異なるアルファベットは Tukey 検定によって 5 %水準で処理区間に有意差あり

注 4) **1 %, *5 %水準で有意差あり，nsは有意差なし

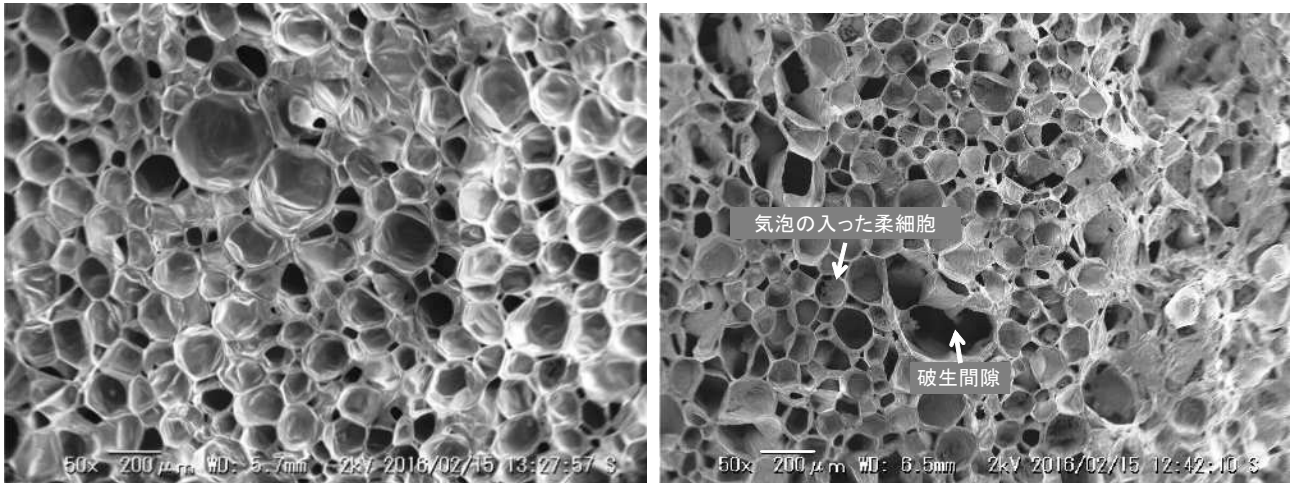


図 22 ‘桜島おごじょ’における肥大根の正常な柔組織組およびす入りのある柔組織断面の走査型電子顕微鏡写真
 注1) 左：正常な組織，右：す入り組織
 注2) バーは200 μmを示す

表 17 ‘桜島おごじょ’ および ‘在来品種 (桜島)’ における施肥方法および株間の違いが養分含有率に及ぼす影響

品種	施肥方法	株間 (cm)	養分含有率 (乾物当たり%)									
			葉					根				
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
桜島おごじょ	基肥重点	50	5.6	1.4	6.0	12.0	0.6	3.1	1.4	8.9	10.4	0.6
		100	5.8	1.7	6.4	11.1	0.5	4.1	2.2	10.4	10.6	0.7
	追肥重点	50	5.9	1.4	6.3	10.9	0.6	3.0	1.5	8.8	9.7	0.5
		100	5.3	1.7	7.3	12.4	0.6	3.0	1.5	8.8	10.6	0.6
在来品種 (桜島)	基肥重点	50	5.3	1.5	5.2	12.1	0.5	2.6	1.6	7.3	11.1	0.6
		100	5.1	1.1	4.1	14.2	0.5	4.3	1.7	9.3	11.4	0.8
	追肥重点	50	4.9	1.3	6.6	12.3	0.5	2.9	1.3	7.7	10.8	0.5
		100	4.8	1.2	5.4	15.3	0.8	4.0	1.6	7.6	10.6	0.5
分散分析 ¹⁾	品種		*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns
	施肥		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
	株間		ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns

注1) * : 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし

(3) 養分含有率

表 17 に ‘桜島おごじょ’ および ‘在来品種 (桜島)’ における施肥方法および株間の違いが養分含有率に及ぼす影響を示した。葉における窒素は, ‘桜島おごじょ’ が 5.3 ~ 5.9 %, ‘在来品種 (桜島)’ が 4.8 ~ 5.3 % で ‘桜島おごじょ’ が ‘在来品種 (桜島)’ に比べて高かった。リン, カリウム, カルシウムおよびマグネシウムは, 品種, 施肥方法および株間の違いで有意な差は認められなかった。肥大根において, 窒素は ‘桜島おごじょ’ の追肥重点区を除き, 株間 100 cm が 50 cm に比べて高かった。カリウムは ‘桜島おごじょ’ が ‘在来品種 (桜島)’ に比べて高かった。カルシウムは, ‘桜島おご

じょ’ が 9.7 ~ 10.6 %, ‘在来品種 (桜島)’ が 10.6 ~ 11.4 % で, 追肥重点・株間 100 cm 区を除き, ‘桜島おごじょ’ が ‘在来品種 (桜島)’ に比べて低かった。マグネシウムは, いずれの処理区においても追肥重点区が基肥重点区に比べて低かった。リンは, 品種, 施肥方法および株間の違いで有意な差は認められなかった。

ダイコンの空洞症の発生は, 窒素施用量と関係が深く, 基肥および全体の施肥量が多いと助長される (岩瀬・大場, 1984)。第 1 章で, 著者は空洞面積率の遺伝率は肥大根重に比べて低く, 空洞症の発生は環境の影響を受けやすい形質であることを明らかにした。したがって, 空洞症の発生が少ない品種の選抜は環境による影響の少な

い整備されたほ場で比較試験を繰り返しながら、個体単位でなく系統単位で行うことが望ましいと提案し⁵⁹⁾、また、この方法で空洞症の発生が極めて少ないF₁品種‘桜島おごじょ’の育成に成功した。

本章で記述した研究から、基肥重点区は追肥重点区に比べて空洞発生度が高く、株間100 cm区は50 cm区に比べて高いことから、空洞症の発生には施肥方法および株間の影響が大きいことが明らかになった。また、空洞発生度は、収穫時の葉重、間引き終了時の直上投影葉面積および間引き終了時まで窒素施肥量との間に、それぞれR=0.93、R=0.89およびR=0.97の高い正の相関が認められたことから、初期の窒素量が多いことは地上部生育を旺盛にし、空洞の発生を助長すると考えられた。得られた結果は、岩瀬・大場²¹⁾の宮重系品種において基肥が多い栽培をすると空洞症の発生を助長するという結果を支持するものであった。

桜島大根の根域は、‘聖護院大根’に比べて広いことが知られており³⁹⁾、本研究でも、追肥重点区において、その側根長は70 cm以上に達していた。これらのことから、土壌中の窒素量は根の伸長にも強く影響しており、空洞症の発生は、地上部の生育だけでなく地下部の生育とも関係していると推察された。

桜島大根のカルシウム含有率は葉：10.9～15.3%、肥大根：9.7～11.4%で、栽培条件は異なるものの宮重系品種の‘耐病総太り’の葉：4.5%、根：0.9%⁴³⁾に比べて葉で2倍以上、肥大根で10倍以上と高かった。一方、‘桜島おごじょ’は‘在来品種（桜島）’に比べてカルシウム含有率が低かった。一般に、植物体中のカルシウムは細胞壁中に多量に存在しており、ペクチン質の架橋構造を形成していることが知られている⁵⁶⁾。このことから‘在来品種（桜島）’と‘桜島おごじょ’のカルシウム含有率の違いが空洞症の発生に何らかの影響を与えている可能性も推察された。さらに、桜島大根は他のダイコン品種に比べて煮崩れしにくいこと、漬け物の食感が異なることとカルシウム含有率との関係についても検討する必要があると考えられた。

ダイコンのす入りは、同化産物の量と根の肥大成長のバランスが保たれなくなった場合に生じ、柔細胞が崩壊した現象と考えられており、早生品種では、す入りの発生が早く、逆に晩生品種は遅い傾向があるなど、その発生には品種間差が認められている⁹⁾¹¹⁾。本研究においても、‘在来品種（桜島）’は‘桜島おごじょ’に比べてす入りの発生が早かったことから、桜島大根の集団内においてもその発生に品種・系統間差があると考えられた。加えて、‘桜島おごじょ’は、1月19日時点です入りの

発生が認められなかったことから、す入り発生について‘桜島おごじょ’は、‘在来品種（桜島）’に対して優位性を持つと考えられた。

施肥方法については、萩屋¹⁰⁾は‘二十日大根’において3要素中窒素が地上部および地下部の成長に最も大きな影響を与え、す入りは成長が旺盛で根の肥大が優れるほど発生が多く、その発生については肥大根重や柔細胞の大きさと正の、T-R率や根の可溶性物質の含量と高い負の相関関係があるとしている。

本研究において、‘桜島おごじょ’では追肥重点・株間100 cm区のす入り程度が大きかったことは、追肥重点区の肥大倍率が基肥重点区に比べて高く、間引き以降、急激に根が肥大したと関係があると考えられた。また、‘在来品種（桜島）’においては、肥大倍率とす入り程度に一定の傾向が認められなかった。このことは‘在来品種（桜島）’の遺伝的なバラツキの影響が考えられ、‘在来品種（桜島）’の集団内には、す入りの発生しやすい系統と発生しにくい系統が混在していると推察された。

富樫⁶³⁾は、本研究で行った施肥方法と類似した株と株の間に局所施用する方法について、加工用ダイコン品種である‘干し理想’を用いて試験を行っている。その結果、保肥力が弱く、透水性が高い砂丘地土壌において、この施肥方法は必要な時期に必要な量を施用できる点で窒素の過剰施肥を減らすことが可能であり、環境負荷の少ない方法であると提案している。桜島の土壌は保肥力が弱く、透水性の高い点において砂丘土壌と類似しており、上記のような局所施肥方法は、施肥時期を遅らせることで初期窒素濃度を制御できるだけでなく、桜島大根の広い株間とその長い側根を有効に活用した方法であると考えられた。

‘桜島おごじょ’の桜島での現地適応性試験では、空洞症とす入りの発生がほ場でバラツキがあったこと、また、近年、‘桜島おごじょ’以外の桜島大根品種において空洞症の多発が問題になったこと²⁷⁾は、以下の理由が起因したと考えられた。すなわち、品種維持のための採種技術の伝承不足および空洞症発生を抑制するための追肥施用技術が生産者個々で変化したことである。

第2節 肥効調節型肥料による施肥方法および播種期の違いが空洞症発生に及ぼす影響

1 緒言

本研究で育成した‘桜島おごじょ’の現地への導入・普及に向けて、空洞症およびす入りが大きな問題であった。す入りの問題は適期収穫によってほぼ回避できたが、空洞症については、本品種の使用に加えて、施肥法の改良や播種期などさらに検討する余地が残されている。

桜島大根についても、一般的なダイコンと同様に遺伝要因に加えて環境要因が空洞症発生に大きく影響することが分かってきた⁵⁹⁾。例えば、間引き終了時（播種25日後）までの窒素施肥量と空洞症発生に高い正の相関（0.97）が認められ、生育初期の土壌窒素濃度が高いと空洞症の発生が増えること、また、反対に基肥中の窒素量を減らし、追肥中心に局所施用する（追肥重点）ことで発生が抑制されることが明らかになった⁶⁰⁾。しかしながら、追肥重点の施肥には当然ながら多大な労力を要する。実際、桜島などの栽培地では追肥回数が5回以上にもなるため、労働過多になるのみならず、最適な施肥時期や施用量を定めることも困難であった。

追肥作業の省力化と施用量の削減を目的とした肥効調節型肥料の利用は、ダイコン^{15) 16)}をはじめとする多くの野菜（ハクサイ⁵⁸⁾、キャベツ⁵²⁾、イチゴ³³⁾）で実施されてきた。しかしながら、桜島大根の栽培ではこれまで検討されたことはない。

‘源助大根’について Fukuoka・Kano⁷⁾は、早播き栽培（7月14日播種）で空洞症が多発し遅播き栽培（8月20日播種）で発生が著しく減少すると報告している。桜島大根の一般的な播種期は8月下旬から9月中旬であり³⁷⁾、近年の温暖化による高地温が空洞症の多発に影響していることも考えられる。しかし、‘桜島おごじょ’において空洞症の発生と播種期の関係についてはわかっていない。

そこで、本節では‘桜島おごじょ’について肥効調節型窒素肥料の利用による空洞症抑制について検討し、併せて、播種期の空洞症発生への影響についても検討した。

2 材料および方法

(1) 肥効調節型および速効性の窒素肥料配合割合が肥大根重と空洞症発生に及ぼす影響（試験1）

栽培試験は、当センター多腐植質黒ボク土壌の露地ほ場で実施した。本露地ほ場は、約1.0 haを6区画に分画してあり、前作に2016年度はサツマイモを、2017年度はカボチャを作付けした。播種から収穫までの時期は、2016年度が8月～12月、2017年度が9月～1月であっ

た。また、年度ごとの栽培試験は同一ほ場の異なる区画で実施した。

いずれの年度もクリーニングクロープとしてソルガムを作付けし（4～7月）、播種約3か月後にはほ場から持ち出した。供試品種は、‘桜島おごじょ’で1区40株の2反復の栽培を行った。2016年度は畝幅100 cm、株間70 cmの白色マルチ栽培を行い、8月31日に播種し、同年12月25日（播種116日後）に収穫した。一方、2017年度は畝幅120 cm、株間70 cmの白色マルチ栽培を行い9月19日に播種し、翌年の1月9日（播種112日後）に収穫した。いずれの年度も1か所に5粒ずつ播種し、2016年度は9月21日（播種21日後）に、2017年度は10月19日（播種30日後）に間引きし1本立ちとした。

本試験では、間引き終了時までの窒素溶出量を最小限に留めることを目的として、肥効調節型肥料は溶出抑制期間45日のシグモイド100日タイプ被覆尿素（LPコートSS100、ジェイカムアグリ（株）；以下LPSSと記載）の効果を調査した。試験区は窒素配合割合をLPSSで50%、70%、90%とし（以下、LPSS50%区、70%区、90%区）、それ以外は速効性窒素質肥料である硫酸および燐安を用い、それぞれの窒素総施用量は $1.5 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ とした。速効性窒素肥料を用いた理由は、初期成長速度を維持するためである。リン酸およびカリは過リン酸石灰および塩化カリで窒素と同量、ホウ素を $36 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ 、ほ場全層に施肥した。

追肥重点区の施肥は、現行栽培農家から聞き取りした情報および羽子田¹²⁾の慣行栽培（9月上旬、中旬、10月上旬、中旬、11月中旬に1回あたり窒素成分で10 aあたり 8.0 kg ずつを5回施用）を参考に実施した。具体的には、まず、基肥にリン酸を $0.7 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ およびホウ素 $36 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ を全層施用し、追肥は、いずれの年度も株と株の間に直径約15 cm、深さ約5 cm程度の穴を開け3回施用した。2016年度は播種14日後に窒素、カリをそれぞれ $0.35 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 、播種21日後に同じ場所に、窒素、カリをそれぞれ $0.35 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 、播種30日後に窒素、リン酸、カリをそれぞれ $0.8 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 同様に局所施用した。2017年度は播種18日後に窒素、カリをそれぞれ $0.35 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 、播種34日後に窒素、カリをそれぞれ $0.35 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 、播種49日後に窒素、リン酸、カリをそれぞれ $0.8 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 局所施用した。

間引き時の1株重は地上部および地下部のすべての新鮮重を、葉重は根を切断したすべての地上部の新鮮重を、肥大根重は根端部の直径が約1 cmの部位で切り揃え、側根を切除した新鮮重を測定した。空洞症発生株率は、縦割りにした根を目視によって判定しその割合を算出し

た。さらに、空洞症の発生程度を詳細に評価するために、空洞症面積率を算定した。詳細は第1章第1節と同様な方法で行った。収穫調査については、試験区を1畝10株の4畝と設置し、内側2畝の中央部分各5株の2か所計10株を収穫し調査を実施した。商品収量は、空洞症が全く発生していない個体および漬物加工で問題にならない程度の軽微な空洞症を有する個体(図23)の肥大根重量の総計とした。地温は畝表面から深さ10 cm位置をロガー機能付き温度計(TR-52i, (株)ティアンディ)で測定した。

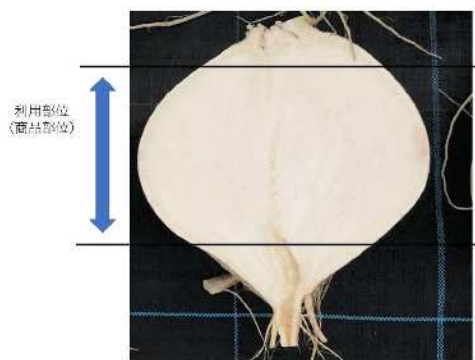


図23 漬物加工に利用可能な空洞症の程度

作業時間は以下の通り求めた。2017年度に行われたLPSS50%区および追肥重点区の2試験区に対して同一の作業者が要した全作業時間を集計し、耕地面積で除算して10a当たりの作業時間を算出した。土壌pH(H₂O)はガラス電極法によって測定した(東亜ディケーター, HM-25RおよびHORIBA, F-22)。

土壌中の交換性塩基類はSchollenberger法で交換・抽出したものを原子吸光法(パーキンエルマー, PinAAcle700および日立ハイテクサイエンス, ZA5310)で定量した。陽イオン交換容量(以下, CECと記す)は交換・抽出したNH₄⁺を蒸留法で定量した。可給態リン酸はトルオーグ法で抽出し, 分光光度計(島津製作所, UV-1700および日立ハイテクサイエンス, U-1500)で定量した。アンモニア態および硝酸態窒素は, 風乾細土を2M塩化カリウム液で浸出後, 蒸留法から求めた。可給態窒素は, 風乾細土10gを100ml容UMガラスサンプル瓶にとり, 最大容水量の60%になるように蒸留水を加え, 30℃で4週間培養後の無機態窒素量から培養前の無機態窒素量を減じて算出した。LPSS100の窒素溶出率は, 2016年度の試験において肥料各2.0gを充填したナイロンメッシュ袋を施肥前に約10cmの深さに埋め込み, 播種時から2~3週間間隔で2袋ずつ回収し, ケルダール分解・蒸留法によって残存量を計測すること

で算出した。

植物体の養分含有率は, 硫酸一過酸化水素水分解後, 希釈液を分析に供し, 全窒素は水蒸気蒸留法, リン酸はバナドモリブデン酸法, カリは原子吸光度計(Analyst700, PerkinElmer, Inc.)で測定した。

(2) 播種期および窒素施肥法の違いが肥大根重および空洞症発生に及ぼす影響(試験2)

試験1の2017年度と同一ほ場で試験を実施した。一般に桜島大根の播種期は8月下旬~9月中旬であることから, 播種期を早播き区では8月31日, 遅播き区では9月19日の2水準とし, 施肥方法を試験1のLPSS90%区および追肥重点区とした。追肥重点区は早播き区が, 播種18日後, 29日後および53日後, 遅播き区では, 播種18日後, 34日後および49日後に試験1と同様に追肥した。早播き区は9月29日(播種29日後), 遅播き区は10月19日(播種30日後)にそれぞれ間引きし1本立ちとし, 収穫は, 早播き区12月12日(播種103日後), 遅播き区1月9日(播種112日後)に行った。供試品種は, '桜島おごじよ'とし, 畝幅120cm, 株間70cmの白色マルチ栽培で1区40株の2反復の条件で栽培した。収穫時の調査は, 試験1と同様に実施した。調査方法は試験1と同様な方法で実施した。

空洞症発生株率については, アークサイン変換後に統計処理を行った。

3 結果および考察

(1) 肥効調節型および速効性の窒素肥料配合割合が肥大根重および空洞症発生に及ぼす影響

2016年度と2017年度の2か年試験したほ場の試験開始時の土壌化学性を表18に示した。無機態窒素含量は2016年度が0.30 mg・100g乾土⁻¹, 2017年度が0.53 mg・100g乾土⁻¹であった。可給態窒素含量は2016年度ほ場が1.1 mg・100g乾土⁻¹, 2017年ほ場が2.7 mg・100g乾土⁻¹であった。可給態リン酸含量は2016年度ほ場が14.0 mg・100g乾土⁻¹, 2017年度が24.9 mg・100g乾土⁻¹であった。CECは2016年度が25.6 cmol・kg乾土⁻¹で2017年度が30.7 cmol・kg乾土⁻¹で2016年度が小さかった。以上の結果から2016年度ほ場が2017年度に比べて地力が低いほ場であると考えられた。

図24に2か年の時期別の日平均地温の推移を示した。日平均地温は2016年度が2017年に比べて8月下旬~9月下旬までは高い日が多く, 2017年度は9月20日頃まで25℃以上で推移した。図25に2016年度ほ場でのLPSS100の累積窒素溶出率の推移を示した。播種後30日間は窒素溶出量が少なかった。

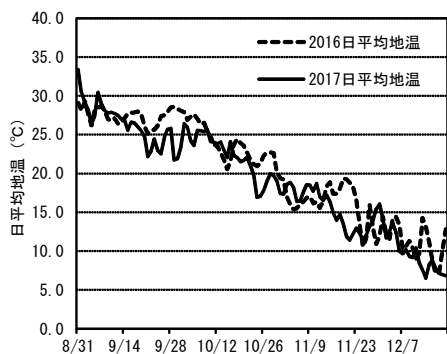


図24 年度別の日平均地温の推移

注1) マルチ表面から深さ10cmを測定

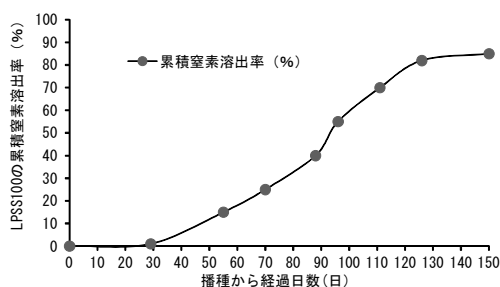


図25 LPSS100の累積窒素溶出率の推移(2016年)

表18 試験開始時の土壌化学性(乾土当たり)

年度	pH (H ₂ O)	アンモニア 態窒素 (mg100g ⁻¹)	硝酸態 窒素 (mg100g ⁻¹)	可給態 窒素 (mg100g ⁻¹)	可給態 リン酸 (mg100g ⁻¹)	交換性陽イオン濃度 (cmol _c kg ⁻¹)			
						CEC	K	Ca	Mg
2016	6.6	0.30	N. D. ¹⁾	1.1	14.0	25.6	0.4	12.0	3.0
2017	6.2	N. D.	0.53	2.7	24.9	30.7	0.9	13.9	3.6

注1) N.D.: 検出限界

表19 窒素施肥法の違いが間引き時の1株重, 収穫時の葉重, 肥大根重, 空洞症発生および収量に及ぼす影響

年度 (播種日)	施肥法	間引き時 1株重 (g)	収穫時					総収量 (kg10a ⁻¹)	商品収量 (kg10a ⁻¹)
			葉重 (kg)	肥大 根重 (kg)	空洞症 発生株率 (%)	空洞症 面積率 (%)			
2016 (8/31)	LPSS50	40	2.33	4.59	100	18.92	6,550	1,320	
	LPSS70	43	2.21	5.88	85	9.51	8,398	2,563	
	LPSS90	34	2.17	5.27	45	0.02	7,523	6,751	
	追肥重点	24	1.89	5.96	20	0.02	8,516	7,691	
2017 (9/19)	LPSS50	377	2.82	6.87	100	21.84	8,173	3,245	
	LPSS70	384	2.52	8.20	95	4.81	9,756	3,410	
	LPSS90	376	2.33	7.78	35	0.38	9,256	8,375	
	追肥重点	330	2.28	7.47	0	0.00	8,887	8,887	
年度の平均	2016	35 ^{b1)}	2.15 ^a	5.42 ^b	63 ^a	7.12 ^a	7,747 ^a	4,581 ^a	
	2017	367 ^a	2.49 ^a	7.58 ^a	58 ^a	6.76 ^a	9,018 ^a	5,979 ^a	
施肥法の平均	LPSS50	209 ^{a2)}	2.58 ^a	5.73 ^b	100 ^a	20.38 ^a	7,361 ^a	2,282 ^b	
	LPSS70	214 ^a	2.37 ^a	7.04 ^a	90 ^b	7.16 ^b	9,077 ^a	2,987 ^b	
	LPSS90	205 ^a	2.25 ^a	6.52 ^a	40 ^c	0.20 ^b	8,389 ^a	7,563 ^a	
	追肥重点	177 ^b	2.09 ^a	6.72 ^a	10 ^c	0.01 ^b	8,701 ^a	8,289 ^a	
分散分析 ³⁾	年度	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	
	施肥方法	**	ns	*	**	**	ns	**	
	交互作用	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

注1) 異なるアルファベットは Student の t 検定によって 5%水準で処理区の間有意差あり

注2) 異なるアルファベットは Tukey の HSD 検定によって 5%水準で処理区の間有意差あり

注3) 分散分析で**は1%水準で有意差あり, nsは有意差なし

窒素施肥法の違いが間引き時の1株重, 収穫時の葉重, 肥大根重, 空洞症発生および収量に及ぼす影響を表19に示した。間引き時の1株重は2016年度が2017年度に比べて軽く, 追肥重点区がLPSS50%, 70%, 90%に比べて軽かった。両年とも収穫時の葉重および肥大根重は窒素施肥法の違いで大きな差は認められなかった。また, 空洞症発生株率は, 窒素施肥法に有意な区間差が認められ, LPSS50%区およびLPSS70%区が85~100%で, LPSS90%区と追肥重点区は0~45%であった。

表 20 窒素施肥方法の違いが部位別の養分吸収量に及ぼす影響

年度	収穫時期	施肥法	葉 (kg10a ⁻¹)			根 (kg10a ⁻¹)		
			T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2016	80日後	LPSS50	6.8	3.1	16.2	6.2	3.7	18.5
		LPSS70	6.7	3.3	17.6	7.9	4.1	20.0
		LPSS90	7.0	3.4	18.9	7.4	3.6	18.9
		追肥重点	8.4	4.0	20.4	7.5	3.7	19.4
	120日後	LPSS50	7.3	2.1	11.6	10.2	5.6	28.0
		LPSS70	8.3	2.3	11.0	12.1	6.1	31.8
		LPSS90	5.9	1.9	10.2	10.6	5.6	27.7
		追肥重点	8.0	2.5	13.5	13.1	6.9	31.4
2017	80日後	LPSS50	12.8	3.5	24.7	3.0	1.7	9.1
		LPSS70	14.8	4.0	28.4	3.2	1.7	10.2
		LPSS90	11.2	3.2	22.7	3.2	1.7	9.2
		追肥重点	10.7	2.7	20.9	3.0	1.4	7.9
	120日後	LPSS50	9.8	2.4	14.5	8.8	4.9	23.7
		LPSS70	11.7	2.8	16.2	10.6	4.9	27.5
		LPSS90	10.3	2.6	13.4	11.1	5.2	27.6
		追肥重点	10.4	2.5	14.6	10.9	4.9	25.5
収穫時期の平均	早	9.8 a ¹⁾	3.4 a	21.2 a	5.2 b	2.7 b	14.2 b	
	遅	9.0 a	2.4 b	13.1 b	10.9 a	5.5 a	27.9 a	
施肥法の平均	LPSS50	9.2 a ²⁾	2.8 a	16.7 a	7.0 a	4.0 a	19.8 a	
	LPSS70	10.4 a	3.1 a	18.3 a	8.5 a	4.2 a	22.4 a	
	LPSS90	8.6 a	2.8 a	16.3 a	8.1 a	4.0 a	20.8 a	
	追肥重点	9.4 a	2.9 a	17.3 a	8.6 a	4.2 a	21.1 a	
分散分析 ³⁾	収穫時期	ns	**	**	**	**	**	
	施肥方法	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

注1) 異なるアルファベットは Student の t 検定によって 5% 水準で処理区間に有意差あり

注2) 異なるアルファベットは Tukey の HSD 検定によって 5% 水準で処理区間に有意差あり

注3) 分散分析で**は 1% 水準で有意差あり, ns は有意差なし

空洞症面積率は LPSS50 % 区が他の区に比べて高く、発生程度が甚大であった (図 26)。総収量は窒素施肥法の区間に大きな差は認められなかったが、商品収量では LPSS90 % 区および追肥重点区が LPSS50 % 区および LPSS70 % 区に比べて多かった。



図 26 LPSS50 % 区における空洞症発生状況

注1) 赤白棒は 20 cm 幅

窒素施肥法の違いが部位別の養分吸収量に及ぼす影響を表 20 に示した。窒素、リン酸およびカリの養分吸収量について窒素施肥法の違いによる有意な差は認められなかった。収穫時期において、葉では播種 80 日後のリン酸およびカリが 120 日後に比べて多く、肥大根では、いずれも 120 日後が 80 日後に比べて多かった。

基肥窒素投入量と空洞症発生株率の相関を図 27 に示した。基肥窒素投入量と空洞症発生株率との間には、正の相関が認められ、相関係数 R=0.97 であった。

窒素施肥法の違いが施肥作業時間に及ぼす影響を図 28 に示した。10 a あたりの施肥作業時間は、追肥重点区が約 12 時間であったのに対し LPSS 区は約 3 時間と肥効調節型肥料の利用によって施肥作業時間が大幅に短縮された。

(2) 播種期および窒素施肥法の違いが肥大根重および空洞症発生に及ぼす影響

播種日および施肥方法の違いが間引き時の 1 株重、収穫時の葉重、肥大根重、空洞症発生および収量に及ぼす影響を表 21 に示した。間引き時の 1 株重は早播き区が遅播き区に比べて軽く、追肥重点区が LPSS90% 区に比べて軽かった。

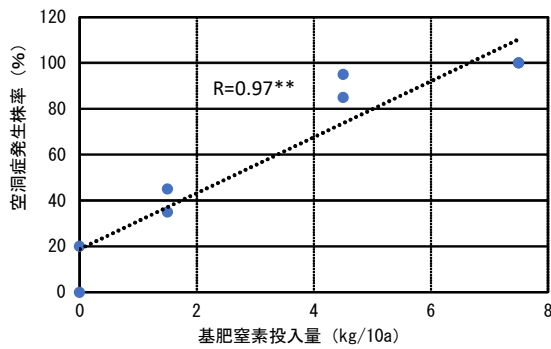


図 27 基肥窒素投入量と空洞症発生率の相関

注 1) ** 無相関検定によって 1% で有意差あり

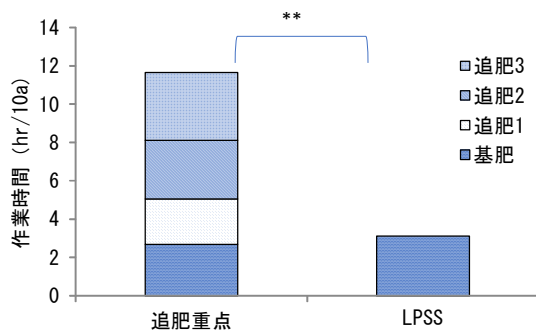


図 28 施肥方法の違いと施肥作業時間

注 1) **t 検定によって 1% で有意差あり

播種期および施肥法の違いは収穫時の葉重に大きく影響しなかった。また、遅播き区の肥大根重は早播き区に比べて重かったが、施肥法の違いによる差は認められなかった。空洞症発生株率は早播き・LPSS90%区が 100%と最も高く、次いで遅播き・LPSS90%区が 35%、遅播き・追肥重点施肥区では発生が認められなかった。空洞症面積率は早播き・LPSS90%区が 23.5%と高く、他に比べて甚大な空洞症が発生した。空洞症発生株率および空洞症面積率において播種期および施肥法に交互作用が認められた。

8月31日播種において、LPSS90%の空洞症発生株率は2016年度が45%(表19)、2017年度が100%(表21)と2017年度が2016年度に比べて空洞症の発生株率が2倍以上と高かった。

当センターが育成した‘桜島おごじょ’は、他の桜島大根品種、‘桜島(マツヲ種苗)’、‘桜島大根((株)トーホク)’および‘桜島大丸(タキイ種苗(株))’に比べて根の揃いが良いこと、空洞が極少であること、す入りが極晩であることの区別性によって品種登録された。このように、桜島大根においても空洞症の発生に品種間差が存在し、本試験で供試した‘桜島おごじょ’は他の

桜島大根品種に比べて遺伝的に空洞症の発生が少ない品種である。

本試験では、当該品種において、まず、肥効調節型窒素肥料を用い、基肥の速効性窒素施用量を少なくすることによる空洞症発生の抑制効果を検討した。岩瀬・大場²¹⁾は、‘耐病総太り’において空洞症の発生は窒素施用量と関係が深く、基肥および総窒素施用量が多い場合に発生が助長されると報告している。本研究でも、基肥の窒素施用量が多くなると桜島大根の空洞症発生割合が高くなることを確認した⁶¹⁾。窒素量が多いことで初期の地上部生育が旺盛になったことも一つの要因と考えられた。

本研究において LPSS の配合割合が高く速効性窒素施用量が少ない場合、空洞症の発生株率が低くなった(表19)。また、基肥窒素投入量と空洞症発生株率との間には、高い正の相関が認められた(図27)。以上の結果を総合すると、遺伝的に空洞症の発生が少ない F₁ 品種‘桜島おごじょ’を用いて、さらに、肥効調節型肥料 LPSS の配合割合を高くした基肥栽培を行うことで、空洞症発生を一定程度抑制できると考えられた。

次に、播種時期が空洞症発生に与える影響を検討した。

Fukuoka・Kano⁷⁾による先行研究によれば、‘源助大根’を早播き(7月14日播種)すると空洞症が多発し、一方、遅播き(8月20日播種)にすると発生が減少すると報告されている。報告の中で、早播きした場合、日最高地温が播種後50日間25℃以上と高く推移したことに伴い、地温が高くなり間隙内部への細胞増生が抑制され、空洞化が進行したと推察している。

間引き時の1株重は LPSS90%区が追肥重点区に比べていずれの播種期でも重く、初期生育が旺盛であった(表21)。このことは LPSS90%区が基肥に速効性窒素を10%含有していることから初期生育が旺盛となり、空洞症発生株率が高まったと考えられた。また、早播き区が遅播き区に比べて間引き時の1株重が軽かった。ダイコンは、30℃以上の高い気温では生育が抑制されることが知られている¹⁴⁾。本試験においても気温が高いことで生育が遅延したと推察された。さらに、播種期と施肥法に交互作用があり、播種期が早く基肥に速効性窒素施用量が多いと空洞症発生が高まるという相乗効果が認められた(表21)。このことは、Fukuoka・Kano⁷⁾の‘源助大根’を用いた結果を支持するものであり、‘桜島おごじょ’においても同様に高地温が肥大根中心部の破生間隙内部への新たな柔細胞の増生を抑制していると推察された。

一方、基肥窒素量の多少は間引き時までの生育量に影響

響しており(表 19, 表 21), 初期の生育量が旺盛になり, その後の肥大根の肥大速度が早まり新たな柔細胞の増生が間に合わなくなることで空洞症発生を助長したと推察された。

8月31日播種において, LPSS90%の空洞症発生株率は2016年度が45%(表 19), 2017年度が100%(表 21)と2017年度の発生株率が高かった。この要因としては, 2017年度は播種期の地温が高く推移したため, 肥効調節型肥料の窒素溶出量が多くなり空洞症発生株率が高まったと推察された。加えて, 可給態窒素の違いもあると

考えられた。このことから, 桜島大根の空洞症発生は地温に加えて, 栽培初期の土壤窒素量にも大きく影響を受けることが示唆された。

以上のことから LPSS90%の基肥を用いて‘桜島おごじょ’を栽培する場合は, 播種期を地温が25℃以下になる9月中旬頃にするすることで空洞症の発生を一定程度抑制でき, 追肥重点栽培と同等の商品収量が得られると期待された。

表 21 播種日および施肥方法の違いが間引き時の1株重, 収穫時の葉重, 肥大根重, 空洞症発生および収量に及ぼす影響

年度	早晚 (播種日)	施肥法	間引き時 1株重 (g)	収穫時				総収量 (kg10a ⁻¹)	商品収量 (kg10a ⁻¹)
				葉重(kg)	肥大根重 (kg)	空洞症発生 株率 (%)	空洞症面 積率 (%)		
2017	早播き (8/31)	LPSS90	147	2.81	6.35	100.0 a ³⁾	23.50 a	7,559	2,655 b
		追肥重点	121	2.79	6.50	20.0 c	0.16 b	7,740	7,390 ab
	遅播き	LPSS90	376	2.40	7.77	35.0 b	0.38 b	9,256	8,375 ab
	(9/19)	追肥重点	330	2.59	7.47	0.0 d	0.00 b	8,887	8,887 a
早晚の平均		早播き	134 b ²⁾	2.80 a	6.42 a	60.0 a	11.8 a	7,650 a	5,022 b
		遅播き	353 a	2.50 a	7.62 b	17.5 b	0.2 b	9,071 a	8,631 a
施肥法の平均		LPSS90	262 a	2.61 a	7.06 a	67.5 a	11.9 a	8,408 a	5,515 a
		追肥重点	226 b	2.69 a	6.99 a	10.0 b	0.1 b	8,313 a	8,138 a
二元配置分散分析 ¹⁾		播種日	**	ns	*	**	*	ns	*
		施肥方法	*	ns	ns	**	*	ns	ns
		交互作用	ns	ns	ns	**	*	ns	ns

注 1) 異なるアルファベットは Tukey の HSD 検定によって 5%水準で処理区間に有意差あり

注 2) 異なるアルファベットは Student の t 検定によって 5%水準で処理区間に有意差あり

注 3) 分散分析で**は 1%, *5%水準で有意差あり, ns は有意差なし

総合考察

近年, 独自性に着目した地域活性化の取り組みが盛んになっており, その一つとして長く栽培されてきた地方品種が着目されている。

地方品種とは, 地域で栽培と採種が続けられてきた在来種であり, 貴重な遺伝資源であるとともに地域の伝統や文化と密接に結びついてきた文化遺産で伝統野菜とも呼ばれる。昭和 30 年代までは, 野菜のほとんどは地方品種であったが, 農業の機械化や生産規模拡大に伴い, 形状や品質の不揃が多い地方品種は, 均一性が高い F₁ 品種を主体とした市販品種に置き換わった。

しかし, 地方品種には市販品種にはない食味など商品特性を持つものも多く地方の食文化とともに細々と維持されてきた。また, 桜島大根は世界一大きい大根として知られており, 伝統野菜としての価値も高い。観光土産品の漬物は, その大きさを強調するような工夫がなされている。したがって, 肥大根の大きさや漬物歩留まりに関係する肥大根形, 内部品質に関係する空洞症, す入りなどは商品化にとって重要な形質である。

(1) 重要形質の遺伝性について

まず, 本研究では, 肥大根重, 肥大根形および空洞症

の遺伝性を検討した。Iwata ら²²⁾ は宮重系品種において肥大根重は広義の遺伝率が高く, 超優性の形質であり, 肥大根の根径/根長比および尻づまりの遺伝様式は不完全優性であると推定している。桜島大根においても肥大根重は類似した結果で, 肥大根の重量は遺伝性が高く, 肥大の良い個体を選抜し優性遺伝子を集積することが重要であると考えられた。一方, 桜島大根の根径/根長比は, 完全優性から超優性と推定された。桜島大根の典型的な肥大根形である扁球の形状は, 肥大根重と同様にヘテロシスの影響が大きいと考えられた。これらの形質の遺伝様式が完全優性から超優性であることから, ヘテロシスを活用できる F₁ 育種は有効であると考えられた。

空洞症については, 発生の程度に品種間差があることが知られている¹⁹⁾²⁹⁾。本研究において空洞症発生に関わる優性遺伝子は空洞の少ない方向に作用した。この優性遺伝子は, 空洞症発生を抑制する方向で働くことから, F₁ 品種育成においては, 片方の親系統に空洞症の発生しにくい系統を利用することで, 空洞症を抑えることができると考えられた。また, 空洞症の程度を示す空洞面積率は, 広義ならびに狭義の遺伝率ともに肥大根重に比べて低く, 空洞症の発生は遺伝要因だけでなく環境要因の影

響も大きいことが明らかになった。

(2) F₁ 品種の育成について

次に、得られた遺伝情報および空洞症の発生しにくい系統を利用して空洞症が発生しにくく、肥大根重および肥大根形が漬物加工に適する品種を育成するための研究を行った。その結果、F₁ 品種‘桜島おごじょ’の育成に成功した。F₁ 品種‘桜島おごじょ’の父本系統である‘か系1号’は、第1章第1節のダイアレル解析で用いた空洞面積率が最も低いP1系統の自殖後代である。

この形質が他の桜島大根品種・系統に比べて‘桜島おごじょ’の空洞症が発生しにくいという特性に寄与していると推察された。‘桜島おごじょ’の母本系統である‘か系2号’は、第1章第1節のP7系統とす入りの遅い別系統を交雑し、自殖によって固定を進めた系統である。本系統は、す入りの発生が極めて遅いことがわかっている。つまり、両親系統が持つ優良形質を受け継いだことで、空洞症が発生しにくく、す入りが遅いF₁ 品種‘桜島おごじょ’を育成できたと考えられる。また、本品種の肥大根形は桜島大根独特の典型的な形態を持つが、尻づまりの形質については、‘か系1号’が先尖りの形質を受け継ぐ系統であったため、尻づまりがやや劣る。尻づまりを向上させるためには、本研究で見いだされた本形質に関与している劣性遺伝子をホモに持つ系統育成が必要であると考えられた。

F₁ 品種の均一性の高さは、これまでの宮重系品種（青首系）における民間育種によって実証されている。今回育成した‘桜島おごじょ’は桜島大根では最初のF₁ 品種であり、均一性は自然受粉品種に比べて高い。また、肥大根重は従来の自然受粉品種に比べて同等以上で肥大根形は桜島大根の典型的な扁球である。さらに、空洞症の発生が少なく、す入りの発生も極めて遅いことから、当初の育種目標をほぼ達成できたと考える。

(3) F₁ 純度検定について

F₁ 品種の商業栽培において最も重要なポイントは、F₁ 種子を大量、かつ安定的に採種する技術を確認することである。本研究では、ダイコンをはじめとする多くのアブラナ科野菜で一般的に活用されてきた自家不和合性とミツバチ受粉に基づく採種法を採用した。しかしながら、たとえ本採種法を利用して、親系統の自家不和合性が弱い場合、自殖種子あるいは同一系統内交配種子が混入し、F₁ 種子の割合（以下、F₁ 純度）を著しく低下させることが知られている⁴¹⁾。

この対策として、アブラナ科野菜のF₁ 育種においては、S 遺伝子（自家不和合性に関する遺伝子）の多型に基づくPCR-RFLP法のF₁ 純度検定が提唱されている⁴²⁾

⁴¹⁾。本研究で得られたマイクロサテライトマーカーへの利用は、PCR-RFLPと異なり制限酵素処理を省くことができるため時間およびコストの大幅な削減が期待できる。他品目でもメロン⁶⁾、ネギ⁶⁵⁾などF₁ 純度検定にマイクロサテライトマーカーが利用されている。ネギ属においてはマイクロサテライトマーカーを利用した新しい育種方法も提案されている⁶⁶⁾。ネギ属は固定の際の自殖弱勢が強いためF₁ 品種の両親系統の育成・維持が困難である。育種目標形質とマイクロサテライトマーカー座のみを固定し、他の形質は雑ばく性を残すことで自殖弱勢を回避し両親系統の維持に活用する方法である。桜島大根においても雑ばく性を残すことは自殖弱勢による両親系統の弱体化を防ぐことが重要である。

今後は、‘桜島おごじょ’において、本研究で得られたDNAマーカーを用いて、F₁ 純度が高く、採種性を安定させるために両親系統の栽植方法、播種時期など決定する必要がある。また、両親系統の維持・増殖時に本研究で得られたDNAマーカーを利用することで、マーカー座の固定を確認しながら、重要形質以外の他の形質に雑ばく性を残すことで両親系統の自殖弱勢を回避できるであろう。

(4) ‘桜島おごじょ’の栽培方法について

続いて、空洞症およびす入りが発生しにくいという‘桜島おごじょ’の特性を活用した高品質生産（空洞症およびす入りの発生低減）技術の開発を目的とした研究を行った。これまで、桜島大根の栽培は生産者が個々に経験的に得られた情報を基に行われ、商業生産上、大きな問題となる空洞症発生の環境的な要因も不明であった。

空洞症発生を軽減するための栽培法の開発を目指し、施肥を中心に播種期や株間などについて検討した。Fukuoka・Kano⁷⁾は、宮重系品種の源助大根では、高地温による細胞分裂の阻害、疎植、多施肥および早い間引きによる肥大根の急激な細胞成長によって空洞症が発生すると考察している。

本研究において、空洞症の発生には施肥方法および株間の影響が大きく、基肥重点施用は追肥重点に比べて空洞症が発生しやすく、株間では100 cmが50 cmに比べて発生しやすいことが明らかになった。この結果は、基肥の窒素量が間引き時までの生育量に大きく影響しており、窒素量が多いと初期の生育量が旺盛になり、さらに、その後の肥大根の生育にも影響することを示している。また、急激な生育があるにも関わらず、肥大根内部で実際に起こる柔細胞の分裂が間に合わなくなることで空洞症発生を助長したと推察された。

株間を広くした場合も、肥大根の肥大速度が速まることで空洞症発生を助長すると考えられた。また、播種期を早めることも空洞症の発生を助長することが明らかになった。この結果は、高地温が肥大根内部の新たな柔細胞の分裂に影響していると推察された。上述の結果に基づき、遺伝的に空洞症が発生しにくい‘桜島おごじょ’を栽培する際には、①播種期を地温が概ね 25 °C 以下となる 9 月中旬以降とし、②株間を 50 cm に狭め、③追肥主体で窒素を施用することで空洞症の発生をほぼ抑え込むことができると考えられた。

す入りは、同化産物の量と根の肥大成長のバランスが保たれなくなった場合に生じ、柔細胞が崩壊した現象と考えられており、早生品種では、早く生じ、逆に晩生品種では遅い傾向があるなど、す入りの発生には品種間差が認められている⁹⁾¹¹⁾。一般的に追肥重点型の施肥は基肥重点型に比べす入りが発生しやすいとされるが、そのような条件でも‘桜島おごじょ’は桜島大根の他品種に比べてす入りの発生が極めて遅いため 2 月上旬までに収穫することでその発生をほぼ回避できると考えられた。

さらに、施肥方法に関連して、‘桜島おごじょ’を用いて、肥効調節型窒素肥料と空洞症発生の関係を検討した結果、溶出抑制期間 45 日のシグモイド 100 日タイプの被覆尿素 LPSS100 を 90 % 配合することで、漬物用途に問題ないまでに空洞症の発生を回避できることが明らかになった。

桜島大根が栽培されている鹿児島県鹿児島市桜島のほ場は、日本土壌インベントリーにおいて未熟黒ボク土に分類されている⁴⁷⁾。当土壌の特性は、透水性が大きく、CEC も 5 cmol・kg 乾土⁻¹ 程度と本試験を実施した露地ほ場 30 cmol・kg 乾土⁻¹ 程度に比べて極めて小さい。また、可給態窒素量が 2 mg・100 g 乾土⁻¹ 以下のほ場も多い（データ略）。すなわち、桜島のほ場は、本研究を実施した露地ほ場に比べて、腐植含量が少なく CEC の小さい未熟な黒ボク土と考えられる。したがって、桜島のほ場は初期窒素濃度を制御しやすいと考えられ、肥効調節型窒素肥料を利用した本施肥法の適応性は高いと予想される。

桜島大根の慣行栽培では、施肥作業は収穫作業に次いで時間を要する作業であった。また、施肥作業は施肥時期や施肥量の決定も生産者の経験に基づき行われてきたため、新規栽培者が栽培技術を習得する際に大きな障壁となってきた。しかしながら、間引き時までの窒素溶出を抑制する LPSS100 を 90 % 配合した肥料を採用することで、施肥時間を 1/3 程度に大幅に短縮できる。加えて、施肥時期や施肥量が規格化（平準化）されているので、

新規栽培者の参入も容易にすると考えられる。

以上のように、本技術によって、空洞症およびす入りが少ない高品質生産が可能となるとともに、施肥方法の平準化や施肥労働の軽減を通じて桜島大根栽培の効率化や継続に大いに貢献するものと期待される。

(5) 将来展望について

桜島の名を冠する桜島大根は鹿児島と聞いて連想される代表的な野菜である。これまで、大きさがギネス世界一に認定され、桜島大根の名前は広く知られているが、その用途は観光土産品として販売される加工品に限られてきた。しかし、近年、同大根に血管拡張作用がある機能性成分「トリゴネリン」が多く含まれていることが明らかにされ³⁶⁾、その機能性にも注目されるようになった。これを契機に、新たな加工品の開発や販路拡大が期待されている。

将来に渡る桜島大根の普及、生産拡大を図るためには、これまでの観光土産を中心とした一部の需要だけでなく幅広い需要拡大が必須である。今回育成した F₁ 品種‘桜島おごじょ’は、①均一性が高いことに加え、②空洞症が発生しにくく、③す入りが入りにくいなどの農業特性の改良が図られたため、高品質生産を可能にせしめると考えられる。実際、本品種を使った青果カット販売の取り組みも大手民間会社で始まり、今後も本品種の利用による販路拡大が期待されている。

桜島大根の生産が大きく減少した要因には、他のダイコンに比べて栽培技術や採種技術に熟練を要することが一つの要因であると考えられる。品種を‘桜島おごじょ’にすることで採種はシステム化され、間引き作業の軽減も期待できる。また、播種時期、株間および施肥方法などの栽培技術を平準化することで、空洞症およびす入りの発生が少ない高品質生産も可能となるであろう。

現在、鹿児島地域振興局、鹿児島市、JA と連携して品種および栽培技術の普及を図っており、2019 年度には桜島大根の全栽培面積（約 8 ha）のうち半分強（4 ha）で‘桜島おごじょ’が栽培されるようになった。また、桜島大根の健康食品としての新たな価値が見いだされたことで、肥大根部に限らず、地上部を含めた葉大根やスプラウトなど桜島大根の新規需要も期待できる。本研究で得られた成果が桜島大根の需要・販路・生産拡大の一助となることを願っている。

謝 辞

本研究を遂行するとともに本論文を取りまとめるにあたり、ご指導とご鞭撻を賜りました鹿児島大学農学部准教授の岡本繁久博士、同教授の遠城道雄博士には心から

深く感謝申し上げます。本研究にご理解をいただき、丁寧なご指導とご校閲をいただきました鹿児島大学農学部教授の山本雅史博士、同准教授の吉田理一郎博士、佐賀大学農学部教授の一色司郎博士に心から感謝いたします。

本研究の開始当初からご指導とご教示を賜った鹿児島大学名誉教授の衛藤威臣博士、同名誉教授の岩井純夫博士に深く感謝申し上げます。品種育成・遺伝解析に関してご助言いただいた岩手大学の畠山勝徳博士、農研機構野菜花き研究部門の小原隆由博士に深く感謝いたします。

桜島大根の栽培管理をしていただいた鹿児島県農業開発総合センターの技術補佐員内野悟志氏、大久保賢一氏、岩切学氏、下山かおり氏をはじめとする多くの方々に感謝申し上げます。

本論文を取りまとめるにあたり、ご指導ご校閲を賜った鹿児島県農業開発総合センター副所長の上野敬一郎博士、熊毛支場園芸土壌研究室長の池澤和広博士には深く感謝申し上げます。長年にわたりご助言と激励をいただいた鹿児島県農業開発総合センター大隅支場長の福元伸一氏に深く感謝いたします。品種育成の基礎をご指導いただいた徳之島支場園芸土壌研究室長の中島純氏、栽培技術に関するご助言をいただいた古江広治博士、永田茂穂氏、桑鶴紀充氏、長友誠氏に深く感謝申し上げます。本研究の実験、分析にご協力いただいた竹之下佳久氏、向吉健二氏、加治屋五月氏に深く感謝いたします。その他、多くの方々にご協力いただきましたことに対し、ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Anderson, J. A., G. A. Churchill, J. E. Autrique, S. D. Tanksley and M. E. Sorrells. 1993. Optimizing parental selection for genetic linkage maps. *Genome* 36: 181-186.
- 2) 伴 拓也・小林伸雄・本谷弘志・門脇正行・松本伸吾. 2009. ハマダイコンの栽培と利用について. *園学研*. 8: 413-417.
- 3) Crisp P. 1995. Radish. In: Smartt J, Simmonds NW (eds.), *Evolution of Crop Plants*, 2nd edn., Longman Group UK, Harlow, UK. 86-89.
- 4) Datta, S., S. Mahfooz, P. Singh, A. K. Choudhary, F. Singh and S. Kumar. 2010. Cross-genera amplification of informative microsatellite markers from common bean and lentil for the assessment of genetic diversity in pigeonpea. *Physiol. Mol. Biol. Plants* 16: 123-134.
- 5) Dwivedi, S. L., K. N. Ray and R. B. Singh. 1980. Diallel analysis of heading date in rice (*Oryza sativa* L.). *Theor. Appl. Genet.* 57: 43-47.
- 6) Fukino, N., Y. Sakata, M. Kunishita and S. Matumoto. 2007. Characterisation of novel simple sequence repeat (SSR) markers for melon (*Cucumis melo* L.) and their use for genotype identification. *J. Hort. Sci. Biotech.* 82: 330-334.
- 7) Fukuoka, N and Y. Kano. 1992. The difference in the development of hollowiness in roots of 'Gensuke' radish between the early and late sowing of seeds. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 60: 881-887.
- 8) Furuta, N., S. Ninomiya, N. Takahashi, H. Ohmori and Y. Ukai. 1995. Quantitative evaluation of soybean (*Glycine max* L. Merr) leaflet shape by principal component scores based fourier descriptor. *Breed. Sci.* 45: 315-320.
- 9) 萩屋 薫. 1952. 根菜類のすいり現象の生理学的研究 (第2報). 大根のすの発現に関係を有する形質の品種間差異に就て. *園学雑*. 21: 165-173.
- 10) 萩屋 薫. 1957. 根菜類のすいり現象の生理学的研究 (第3報). すの発現に及ぼす栽培環境の影響について. *園学雑*. 26: 111-120.
- 11) 萩屋 薫. 1958. 根菜類のすいり現象の生理学的研究 (第5報). 大根の品種間雑種のF1, F2におけるすの発現性および耐す性品種の育種に関する考察. *園学雑*. 27: 68-77.
- 12) 羽子田益雄. 1974. 多肥, 有機質多投一降灰対策一 間引きで優品増収. p. 97-102. *農業技術体系野菜編 9. ダイコン*. 農文協. 東京.
- 13) Hauser, M.-T., F. Adhami, M. Dorner, E. Fuchs and J. Gl-ssl. 1998. Generation of co-dominant PCR-based markers by duplex analysis on high resolution gels. *Plant J.* 16: 117-125.
- 14) 早田保義・篠原 温・鈴木芳夫. 1986. 高温がハツカダイコンの生育及び体内成分に及ぼす影響. *園学雑*. 55: 51-55.
- 15) 平井英行・藤田和久・吉秋 斎. 2010. 加工用源助ダイコンの省力栽培技術. *石川農総研セ研報*. 29: 23-26.
- 16) 本間利光・白鳥 豊・門倉綾子・星野 卓. 2002. 砂丘地ダイコン栽培における環境保全的施肥法の検討. *新潟農総研報*. 5: 11-19.
- 17) Hosaka, K. 2004. An easy, rapid, and inexpensive DNA extraction method, "one-minute DNA extraction," for PCR in potato. *Amer. J. Potato Res.* 81: 17-19
- 18) 藤枝國光. 1983. 品種生態と作型適応性. p. 基 71. *農業技術大系野菜編 9. ダイコン*. 農文協. 東京.

- 19) 市川裕雄・川合貴雄・秋田史郎. 1980. ダイコンの空洞症に関する研究. 第1報. 品種の相違が発生に及ぼす影響. 園学要旨. 昭55秋: 194-195.
- 20) 石村満宏. 1985. 桜島の降灰被害に伴う地域農業の変化. 地学雑誌. 48-57.
- 21) 岩瀬利己・大場貞信. 1984. ダイコンの空どう症に関する研究. 第2報. 窒素の施肥量について. 東北農業研究. 35: 251-252.
- 22) Iwata, H., S. Nikura, S. Matsuura, Y. Takano and Y. Ukai. 2000. Diallel analysis of root shape of Japanese radish (*Raphanus sativa* L.) based on elliptic fourier descriptor. *Breed. Sci.* 50: 73-80.
- 23) Iwata, H., S. Niikura, S. Matsuura, Y. Takano and Y. Ukai. 2004a. Genetic control of root shape at different growth stages in radish (*Raphanus sativa* L.). *Breed. Sci.* 54: 117-124.
- 24) Iwata, H., S. Niikura, S. Matsuura, Y. Takano and Y. Ukai. 2004b. Interaction between genetic effects and soil type in diallel analysis of root shape and size of Japanese radish (*Raphanus sativa* L.). *Breed. Sci.* 54: 313-318.
- 25) Iwata, H. and Y. Ukai. 2002. SHAPE: A computer program package for quantitative evaluation of biological shapes based on elliptic fourier descriptors. *J. Hered.* 93: 384-385.
- 26) Jones, R. M. 1965. Analysis of variance of half diallel table. *Heredity* 20: 117-121.
- 27) 鹿児島県. 2015. 形質の揃いが良く、空洞症・す入りの少ない F₁ 桜島大根「鹿児島5号」の育成. https://www.pref.kagoshima.jp/ag11/pop-tech/zenbu/documents/35926_20131127141720-1.pdf.
- 28) Kano, Y. 1989. Effects of time of high and low temperature treatments on the growth of Japanese radish cv. 'Gensuke' and on the occurrence of hollow root. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 57: 626-632.
- 29) 加納恭卓・福岡信之. 1994. ダイコンにおける空洞発生と木部柔細胞の木化の品種間差異. 園学雑誌. 62: 801-809.
- 30) 梶浦一郎・町田裕・佐々木修・大垣智昭. 2002. ナシ葉形の簡便な数値化法. 園学研. 1: 5-8.
- 31) Kim, H. D. and H. D. Chang. 1986. Utilization of electrophoresis in testing the genetic purity of F₁ hybrid seeds of *Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 27: 191-195.
- 32) 北村四郎. 1958. 大根の品種とその変遷. p. 1-19. 西山市三編著. 日本の大根. 日本学術振興会. 東京.
- 33) 小菅佐代子・東隆夫・三枝正彦. 2001. 肥効調節型肥料の施肥法が促成イチゴの生育・収量に及ぼす影響. 園学雑誌. 70: 616-621.
- 34) Kukita, Y. and K. Hayashi. 2002. Multicolor post-PCR labeling of DNA fragments with fluorescent ddNTPs. *Biotechniques* 33: 502-506.
- 35) 熊澤三郎. 1956. 総合蔬菜園芸各論. 養賢堂. 東京.
- 36) Kuroda, R. K. Kazuma, M. Ushikata, Y. Minami, and K. Kajiya. 2018. Elucidating the improvement in vascular endothelial function from Sakurajima daikon and its mechanism of action a comparative study with raphanus sativus. *J. Agric. food chem.* 66: 8741-8721.
- 37) 宮司祐三・石秋炯・国分禎二. 1958. 桜島大根の系統と採種. p. 65-78. 西山市三編著. 日本の大根. 日本学術振興会. 東京.
- 38) Murai, M. and T. Kinoshita. 1986. Diallel analysis of traits concerning yield in rice. *Japan. J. Breed.* 36: 7-15.
- 39) 中村三七郎・小倉弘司. 1958. 慣行栽培下の成長. p. 59-64. 西山市三編著. 日本の大根. 日本学術振興会. 東京.
- 40) 並河功・中村三七郎. 1958. 桜島大根の起源と栽培現況ならびに利用. p. 52-55. 西山市三編著. 日本の大根. 日本学術振興会. 東京.
- 41) 新倉聡. 2007. アブラナ科野菜における生殖形質の遺伝学的研究とその育種への展開. 育学研. 9 (別1): 8-9.
- 42) Niikura, S. and S. Matsuura. 1998. Identification of self-incompatibility alleles (S) by PCR-RFLP in radish (*Raphanus sativus* L.). *Euphytica* 102: 379-384.
- 43) 西田忠志. 1996. 寒地夏どり機械化一貫栽培. p. 基148の2-13. 農業技術大系野菜編9. ダイコン. 農文協. 東京.
- 44) Nishio, T., M. Kusaba, M. Watanabe and K. Hinata. 1996. Registration of S alleles in *Brassica campestris* L by the restriction fragment sizes of SLGs. *Theor. Appl. Genet.* 92: 388-394.
- 45) 西山市三・根井正利・宮司祐三・高杉喜一・飯塚宗夫. 1958. 遺伝学的研究. p. 98-131. 西山市三編著. 日本の大根. 日本学術振興会. 東京.
- 46) 西森裕夫・衛藤夏葉・藤岡唯志・東卓弥. 2009. 施肥方法の違いが和歌山ダイコンのす入り発生に及ぼす影響. 近畿中国農研. 14: 73-78.
- 47) 農研機構. 2019. 日本土壌インベントリー. <https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/explain/D1.html> 農林水産

- 省. 2018. 全国の作付面積・収穫量・出荷量・平成30年度野菜生産出荷統計. e-Stat 政府の統計窓口.
- 48) 小原隆由・若生忠幸・小島昭夫. 2004. ネギの初期生育量に関するダイアレル分析. 育学研. 6: 11-19.
- 49) 大井美知男. 2002. F₁品種改良で甦った上野大根. p. 78-80. 大井美知男・神野幸洋編者. からい大根と あまい蕪のものがたり. 長野日報社. 諏訪.
- 50) 大瀧直樹・田口和憲・田中征勝. 2002. テンサイの草丈, 葉数および茎葉重に関する片側ダイアレル分析. 育学研. 4: 77-85.
- 51) 大澤 良. 2004. 野菜育種におけるDNA マーカーの利用. 園学研. 3: 1-6.
- 52) 進藤勇人・佐藤福男・金田吉弘. 2001. 寒冷地における肥効調節型肥料を用いた夏どりキャベツの全量局所施肥栽培. 土肥誌. 72: 803-806.
- 53) Suwabe, K., H. Iketani, T. Nunome, T. Kage and M. Hirai. 2002. Isolation and characterization of microsatellites in *Brassica rapa* L. Theor. Appl. Genet. 104: 1092-1098.
- 54) Suwabe, K., H. Iketani, T. Nunome, A. Ohyama, M. Hirai and H. Fukuoka. 2004. Characteristics of microsatellites in *Brassica rapa* genome and their potential utilization for comparative genomics in cruciferae. Breed. Sci. 54: 85-90.
- 55) Suwabe, K., H. Tsukazaki, H. Iketani, K. Hatakeyama, M. Kondo, M. Fujimura, T. Nunome, H. Fukuoka, M. Hirai and S. Matsumoto. 2006. Simple sequence repeat-based comparative genomics between *Brassica rapa* and *Arabidopsis thaliana*: The genetic origin of clubroot resistance. Genetics 173: 309-319.
- 56) Taiz, L. and E. Zeiger. 2002. 植物生理学第3版 (西谷和彦・島崎研一郎監訳). p. 317-344. 培風館. 東京
- 57) 高木 胖・岸川英利・江頭正義. 1990. ダイズの収量に関連する量的形質のダイアレル分析. 佐賀大農集報. 69: 9-16.
- 58) 高橋正輝. 1998. 肥効調節型肥料による施肥技術の新展開 5 野菜の施肥技術 (その2). 土肥誌. 69: 303-309.
- 59) 田中義弘・桑鶴紀充・永田茂穂. 2011. '桜島ダイコン'の根重および空洞症のダイアレル分析. 園学研. 10: 9-13.
- 60) 田中義弘・桑鶴紀充・永田茂穂. 2012. '桜島ダイコン'の根形のダイアレル分析. 園学研. 11: 295-300.
- 61) 田中義弘・長友 誠. 2017. 桜島大根における施肥方法・株間の違いが空洞症・す入りに及ぼす影響. 園学研. 16: 435-441.
- 62) 田中佑樹・熊本耕平・石井修平・西村佳子・富永寛・陳 蘭荘 (庄). 2011. 系統選抜による宮崎県在来野菜「糸巻き大根」の再生および新品種育成へのアプローチ. 南九州大学研報. 41A: 37-41.
- 63) 富樫政弘. 1999. 野菜栽培での省力的・効率的な施肥技術. ダイコンでの効率的な施肥方法. 農耕と園芸. 54(2): 123-125.
- 64) 椿 信一・篠田光江・三浦一将・佐野広伸・佐藤孝夫. 2015. 辛味ダイコン'あきたおにしぼり'における在来品種 F₁ 化の効果. 園学研. 14: 141-146.
- 65) Tsukazaki, H., H. Fukuoka, Y. Song, K. Yamashita, T. Wako and A. Kojima. 2006. Considerable heterogeneity in commercial F₁ varieties of bunching onion (*Allium fistulosum*) and proposal of breeding scheme for conferring variety traceability using SSR markers. Breed. Sci. 56: 321-326.
- 66) Tsuru, M., K. Suwabe, N. Kubo, S. Matsumoto and M. Hirai. 2005. Construction of a molecular linkage map of radish (*Raphanus sativus* L.), based on AFLP and Brassica-SSR markers. Breed. Sci. 55: 107-111.
- 67) 鄭 澤宇・田村義保. 2005. P型フリーエ記述子を用いたハナハス花卉先端部の輪郭線による品種識別. 園学研. 4: 385-390.
- 68) 鶴飼保雄. 1989. 量的形質のダイアレル分析のためのパソコン用プログラム DIALL の作成. 育学雑. 39: 107-109.
- 69) 鶴飼保雄. 2002. 量的形質の遺伝解析. p. 215. 医学出版. 東京.
- 70) 山岸 博. 2006. 栽培, 野生ダイコンにおける系統分化とオグラ型雄性不稔細胞質の起源. 育学研. 8: 107-112.

Breeding and cultivation of the Japanese radish 'Sakurajima daikon'

Yoshihiro Tanaka

Summary

Sakurajima daikon is a traditional cultivar of the Japanese radish mainly produced in Sakurajima, an active volcano, in Kagoshima prefecture in Japan. This study reports the agronomically important genetic traits of Sakurajima daikon. Furthermore, the characteristics of a newly bred F_1 cultivar, 'Sakurajima Ogojo', and the methods for assessing the purity of F_1 seeds and for cultivation adjusted to the new cultivar are described.

Diallel analysis using an 8×8 half-diallel cross among inbred lines disclosed several genetic traits of Sakurajima daikon, as described below.

First, the "root weight" of Sakurajima daikon was found to be governed by the genetic trait referred to as overdominance. Second, the root shape was genetically controlled by overdominance or complete dominance. Third, cavitation was caused by incomplete or complete dominance.

Next, using the obtained knowledge of the genetic traits of Sakurajima daikon, the F_1 cultivar 'Sakurajima Ogojo' was bred, which exhibits cavitation and pithiness at a low rate. As expected, in the field test, the incidence of cavitation and pithiness in 'Sakurajima Ogojo' was certainly lower than that in other openly pollinated varieties. Furthermore, 8 microsatellite markers showing DNA polymorphisms were screened between the two parental lines, which can be used to assess the purity of F_1 'Sakurajima Ogojo'.

Moreover, cultivation techniques, such as "fertilization scheme", "planting distance" and "planting time", for 'Sakurajima Ogojo' were evaluated. The incidence of cavitation was high when fertilizers were mainly used at the time of planting and then occasionally supplemented, whereas that of cavitation decreased by employing the reversed fertilization scheme. Planting distance and planting time also affected the cavitation incidence; sparser planting and earlier planting increased cavitation, compared with the conventional cultivation procedure. In addition, the effects of polyolefin-coated fertilizer on the incidence of the two conditions were examined in view of labor-saving. A combination of LPSS100 with normal basal fertilizer (9:1) resulted in a similar production yield to the conventional cultivation procedure.

This study revealed genetic traits determining the root weight, root shape and cavitation of Sakurajima daikon. Furthermore, a high-quality F_1 cultivar named "Sakurajima Ogojo" was bred using these genetic traits, which produced uniformly sized and shaped taproots with low rates of cavitation and pithiness. In addition, valuable information was also obtained through this study which ensures stable production of F_1 seeds and also helps to develop the cultivation procedure adjusted to this cultivar were obtained. This study expectedly leads to the high-quality production of Sakurajima daikon in the future.

Keywords :cavitation, F_1 , microsatellite, root shape, Sakurajima

