



多様な遺伝資源を利用したバレイショ新規品種の創成に関する研究

森, 元幸

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2009-09-04

(Date of Publication)

2010-05-11

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙3073

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003073>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

多様な遺伝資源を利用した
バレイショ新規品種の創成に関する研究

平成 21 年 7 月

神戸大学大学院農学研究科

森 元幸

【目 次】

第1章 我が国のバレイショ育種の現状と課題	1
第2章 DNA マーカー (RAPD) を用いた遺伝資源の評価	
緒論	10
材料と方法	
供試材料	12
RAPD 法	12
結果	
産地別、器官別 RAPD パターン	13
RAPD バンドの検出	13
命名登録品種の識別	13
供試全品種・系統の識別	13
親子鑑別への試み	20
品種・系統の類縁関係	20
考察	
RAPD 法の品種識別への有効性	23
系統関係	24
日本産品種の遺伝的多様性	25
第3章 ジャガイモシストセンチュウ抵抗性母本系統「R392-50」の育成	
緒論	27
材料と方法	
植物材料と遺伝分析	28
シストセンチュウ抵抗性検定	29
結果および考察	29

第4章 2倍体遺伝資源を用いた橙黄肉色の2倍体バレイショ品種「インカのめざめ」の育成

緒論	32
材料と方法	
親系統	32
育種方法	34
栽培特性調査	34
塊茎の品質特性調査	34
結果	
育成の経過	35
栽培特性	35
塊茎特性	38
病虫害抵抗性	41
考察	41

第5章 肉質部にアントシアニン色素を有する遺伝資源を用いた有色バレイショ品種「インカパープル」および「インカレッド」の育成

緒論	45
材料と方法	
親系統	46
育種方法と特性調査	46
アントシアニン色素の抽出	46
アントシアニン色素の吸光度測定ならびに HPLC 法	48
アントシアニン色素の耐熱性と耐光性試験方法	48
結果	
育成の経過	48
「インカパープル」の特性	49
「インカレッド」の特性	54
「インカパープル」および「インカレッド」の調理特性	54

アントシアニン色素の特徴	55
考察	58
第6章 第2世代有色バレイショ品種群の育成	
緒論	61
材料と方法	
親系統	61
育種方法と特性調査	62
生育経過追跡調査	62
塊茎内アントシアニン色素の分布調査	62
色価による色素評価法	62
結果	
育成の経過	64
生態・形態的特徴、収量性、調理特性および耐病虫性	65
(1) 紫皮紫肉品種「キタムラサキ」	65
(2) 赤皮赤肉品種「ノーザンルビー」	70
(3) 紫皮紫肉品種「シャドークイーン」	72
アントシアニン色素の塊茎内での分布	73
アントシアニン色素の主成分、含量および色価	73
考察	75
第7章 アントシアニン色素の品種・系統間差	
緒論	79
材料と方法	
植物材料	80
アントシアニン色素の抽出法および色調測定法	80
アントシアニン色素の HPLC 分析法	80
結果および考察	
各品種のアントシアニン含有量	81
品種・系統の構成色素成分	85

構成色素成分による品種・系統の類別	85
第8章 総合考察	89
要旨	96
謝辞	100
引用文献	103

第1章

我が国のバレイショ育種の現状と課題

双子葉植物のナス科に属するバレイショは、南アメリカ大陸の太平洋側を縦にはしるアンデス山脈の中央高原地帯にあるチチカカ湖周辺で、少なくとも7,000年前から栽培されていたと推定される (Hawkes 1990)。南米アンデス地域では7種の栽培種 (2倍体種 *Solanum stenotomum* Juz. et Buk.、*S. phureja* Juz. et Buk. および *S. ajanhuiri* Juz. et Buk.、3倍体種 *S. chaucha* Juz. et Buk. と *S. juzepczukii* Buk.、4倍体種 *S. tuberosum* L.、および5倍体種 *S. curtilobum* Juz. et Buk.) があり、そのうち4倍体種 *S. tuberosum* の亜種 *tuberosum* のみが世界中で栽培されている。これら栽培バレイショの祖先となる野生種は、*S. leptophyes* とする Hawkes (1990) の説や複数の種から多元的に栽培化されたとする説 (Sukhotu and Hosaka 2006) など諸説がある。いずれにせよ、まず2倍体種 *S. stenotomum* ができ、これより他の栽培種ができたと考えられている。アンデス地域で最も重要なのはアンデス原産4倍体栽培バレイショ (*S. tuberosum* L. ssp. *andigena* Hawkes) で、その起原について、Hawkes (1990) は *S. stenotomum* と野生2倍体種 *S. sparsipilum* の間で交雑が生じ、その後の染色体倍加によって4倍体種ができたと考えた。しかしこの亜種 *andigena* の持つ多様な遺伝的変異をどう理解するかによって諸説に分かれている。一方、世界中で栽培される亜種 *tuberosum* は一般に普通バレイショ (Common potato) と呼ばれている。Hosaka (2004) は、亜種 *tuberosum* に特徴的な T 型葉緑体 DNA (細胞質遺伝) の起原をたどり、野生2倍体種 *S. tarijense* Hawkes が母親となり、亜種 *andigena* を父親として自然交雑を起こし、前者の全数性卵 (2n egg) が機能して4倍体雑種ができたものと考えた。チリ原産4倍体栽培バレイショ (*S. tuberosum* ssp. *tuberosum*) はこの雑種後代より、何千年も前に分化したとされる。

一方、チリ原産4倍体栽培バレイショ (*S. tuberosum* ssp. *tuberosum*) とは別に、アンデス原産4倍体栽培バレイショ (*S. tuberosum* ssp. *andigena*) が16世紀後半にヨーロッパにもたらされ、長日長条件下でも塊茎が形成されるよう人為的な選抜が加えられた結果、リンネの記載した *S. tuberosum* ができたと考えられている。19世紀初頭までヨーロッパ全域で栽培されるようになっていたが、19世紀半ばにジャガイモ疫病菌がヨーロッパに入り、当時の栽培バレイショは壊滅状況となった。特にアイルランド

ではバレイショを主食としていたため大飢饉（1845～1849年）となり、餓死者は150万人に達し、国外への移民者も100万人を超え人口は激減した（Dowley and O'Sullivan 1995）。アメリカのグッドリッチ（G. E. Goodrich）は、疫病に強い新品種を育成するためパナマの市場からいくつかのチリ原産4倍体栽培バレイショを入手し、その一つに「Rough Purple Chili」と名付け、その自殖種子中より「Garnet Chili」を選抜した。さらに「Early Rose」が育成され、これが世界中の基幹品種となった（Plaisted and Hoopes 1989）。

スペイン人が新大陸でバレイショを初めて目にしてから70年たらずで、原産地とは地球の反対側の日本まで伝来した（Laufer 1938、星川 1998）。導入年には諸説があるが、慶長年間（1596～1614年）に当時オランダの植民地であったインドネシアのジャワ島からオランダ船に乗って北九州の港に伝来した。このため「ジャガタライモ」の名がつき、これから今日のジャガイモの名になった。同じ頃に伝来したサツマイモが江戸時代初期から全国に普及したのに比べ、バレイショの普及はサツマイモの栽培が難しい高冷地などに限られていた。寛永（1641～42年）、宝暦（1755年）、天明（1783～84年）などの飢饉がおこる度に救荒作物として中部地方や東北地方の高冷地などに普及し、甲斐代官の中井清太夫や飛騨代官の幸田善太夫などが領内で栽培を奨励したことが知られている。浅間（1978）によると、北海道には1706年に栽培の記録が残されており、またロシア人によって北方から北海道へ渡来した説があり、アイヌ語の呼び名で「ヌチャトマ（ロシア人のイモ）」などがある。北海道での栽培は、漁場での食糧として貴重なビタミン供給源となっていた。飢饉の度に食糧として関心が高まり、幕末には全国各地で救荒作物として普及した。しかし、我が国においてバレイショが食糧として本格的に栽培されるようになったのは、明治初期に北海道開拓史などが欧米から優良品種を北海道へ導入してから以降のことである。1874年に屯田兵例則が發布され、翌年には札幌近郊に琴似屯田が設置された。安孫子（1968）によれば「私などは屯田兵の子供として育ちました関係から、馬鈴薯によって養われてきた・・・」とあるように、北海道の開拓当初は入植者の重要な食糧として定着した。1901年には17,356 haの栽培面積に達し、主要畑作物として重要な地位を占めるようになった。続いてヨーロッパにおける第1次世界大戦（1914～1918年）をきっかけにでん粉が国際商品として輸出されるようになり、この需要に応えるためにでん粉原料用バレイショの作付けが急増し、北海道は現在も主産地を保っている。

2007年におけるバレイショの作付面積は日本全体で87,400 haであり、生産量は約287万tで、北海道が面積の65%と生産量の78%を占めている。北海道に次いで栽培面積が多いのは、鹿児島県と長崎県で各5%であり、北海道の端境期に相当する春から初夏に収穫されている。過去からの経過を見ると、栽培面積は1960年の約20万haから2007年の約9万haへと半減したものの、総生産量は約300万tを維持している（Table 1）。これはha当りの収量が、18 t/ha（1960年）から33 t/ha（2007年）に増加したためである。

一方、国民一人当りの年間消費量は（Table 1）、1960年頃までは17 kg以上であったが、主食の代用としての役割が無くなり急激に減少して1974年に最低の12.9 kgとなった。その後増加に転じ、1990年以降は17~18 kgで推移している。この消費量の再増加は、生イモを購入して家庭で調理する消費形態から、家庭での調理が減少し加工製品を購入する消費形態への変化を伴っている。1970年に大阪で開催された日本万国博覧会のレストランでは、生イモを油で揚げたポテトフライが飛ぶように売れ、北海道の産地ではでん粉原料用に作付けした畑も早掘りをして出荷し、大儲けをしたとの逸話が語られている。この時が日本におけるバレイショの新しい食形態の幕開けであった。1975年以降の加工食品用の増加は著しく、ポテトチップは1985年までの10年間に消費量が10倍になり、その後ほぼ横這いとなっている。冷凍フライドポテトはハンバーガーショップのチェーン展開とともに消費が増加したが、米国産などの輸入製品が安価・安定供給の理由により多くの割合を占めている。1990年以降、冷凍コロッケやパック詰めサラダの消費が増加し、皮剥きやプレカットなどの一次加工品など業務向け需要が増加した。これらはファーストフード店などの外食産業やコンビニなどのテイクアウト総菜産業での消費が主である。1960年にはほとんど無かった加工食品用の消費量（輸入を含む）は、1997年には約130万tを越えその後は横ばいになっている。現在、バレイショの年間国内仕向け量は約360万tあり、このうち生イモ換算で約80万tが輸入である。でん粉原料用が約110万tあり、これを除いた青果・加工用の3分の1が輸入品由来で増加傾向にあり（Table 1）、国産バレイショの消費拡大は困難である。生イモを加工したポテトチップ、コンビニ弁当や総菜店のポテトサラダやコロッケなどの多くは国産原料だが、いつ輸入品の割合が国産を上回るか判らない。

バレイショは種イモを用いて増殖する栄養系繁殖作物であるが、育種においては種子繁殖作物と同様に交雑育種を主な手法とする。我が国の標準的なバレイショ育種

Table 1 Supply and demand of potatoes in Japan (Anonymous 2009a).

Year	Supply (1,000 t)			Demand (1,000 t)						Per capita / year (kg)
	Domestic	Import	Export	Total	Feed	Seed	Starch	Loss	Food	
1960	3,594	-	22	3,572	547	328	1,007	55	1,635	17.5
1965	4,056	-	12	4,044	601	395	1,382	129	1,537	15.6
1970	3,611	-	6	3,605	396	298	1,365	156	1,390	13.4
1975	3,216	28	-	3,289	151	216	1,168	241	1,453	13.0
1980	3,421	211	-	3,632	91	224	1,417	160	1,740	14.9
1985	3,727	200	-	3,927	60	245	1,582	178	1,862	15.4
1990	3,552	392	2	3,942	47	240	1,280	248	2,127	17.2
1995	3,365	682	1	4,046	32	212	1,307	259	2,236	17.8
2000	2,898	820	3	3,715	17	178	1,023	209	2,288	18.0
2005	2,752	807	1	3,558	8	165	1,058	221	2,106	16.5

の過程を Table 2 にまとめた。交配 (Crossing) を 1 年目とすると、2 年目は実生個体選抜 (Seedling selection)、3 年目は個体二次選抜 (First clonal selection)、4 年目は系統選抜 (Clonal line selection)、5 年目は生産力検定予備試験 (Preliminary yield trial)、6~10 年目は生産力検定試験 (Yield trial)、そして 11 年目で品種登録申請 (Registration) となる。バレイショは同質 4 倍体で、かつ他殖性を基本とするためヘテロ接合性が高く、複雑な遺伝子構成を有するため交雑後代で表現型の分離が大きい。この中から 1 株の飛び抜けて優れる系統を見いだしたなら、これを栄養系世代である塊茎 (イモ) で増殖して品種とする。このとき交配種子数がすなわち変異幅となるため、最初に多数の交配種子を確保し望ましい表現型をいかにして上手く絞り込むかが重要である。交配種子を播種した実生のみが生殖世代であり、その後は塊茎で継代する栄養系世代である。実生での選抜は耐病虫性など質的形質に限られ、次の個体選抜においても環境変異が大きい肉色や形など質的な形質を中心に選抜が行われる。1 作での増殖率が 10~20 倍と低いため増殖と選抜を平行して行い、収量性のような量的形質の選抜には長期の栽培年限を要する。交配から 10 年以上を経て、平均すると 10~20 万粒の交配種子から 1 つの割合で新品種が育成される。バレイショ育種において耐病虫性や収量性の向上は共通する目的であるが、用途に応じた利用特性や品質の改良が課題である。市場出荷を中心とする青果用では、イモの肉質や煮くずれ程度などにより、煮物やマッシュなど異なる調理に適した特性が求められ、その外観は感性に訴える魅力がなければならない。一方、原料では企業経営の採算性と表裏一体であり、歩留りもしくは効率が重要である。ポテトチップは、油加工時に褐変せず製品の歩留りが高いこと、さらに冷凍フライでは、油加工適性に加え乾物分布が均質で大粒であることが望ましい。でん粉原料用では多収に加え、固有のでん粉特性が必要である。

「男爵薯 (原名 : Irish Cobbler)」は、1908 年に函館ドックの川田龍吉男爵が、イギリスから導入し七飯農場で試作した。導入者にちなんで「男爵薯」と呼ばれるようになった。目が深く皮が剥きにくく、その後に育成された品種に比べ病害虫抵抗性が劣るなど欠点は少なくない。しかし早生で広域適応性に優れ栽培技術も蓄積され、長年慣れ親しんだ食味と抜群の知名度で、消費者からも生産者からも歴然とした支持を得て、バレイショの代名詞にされている。1951 年には約 121,000 ha (全体の 60%以上) を占めたが、その後は暫減傾向にあり 2006 年には 24.5%に相当する 21,129 ha となった。「メイクイン」は 1917 年にアメリカから導入された外国産品種で、イギリスのチェルテンハムに近いベンサムで E. Sadler という人が栽培していたもので両親の来歴は不

Table 2 Standard potato breeding scheme and size conducted in one breeding station in Japan.

Year	Step	No. of genotypes	No. of clones	Note
1st	Crossing	-	-	At least one parent with cyst-nematode resistance. Production of approximately 500,000 seeds.
2nd	Seedling selection	150,000	1	Selection for maturity, stolon growth habit, tuber shape, specific gravity, reducing sugar content, cyst-nematode resistance, late blight resistance
3rd	1st clonal selection	20,000	1	Selection for maturity, growth habit, tuber shape and size, internal quality (brown spot, hallow, etc.), eye depth, raw discoloration, starch content.
4th	Clonal line selection	1,500	6	Selection for maturity, growing type, yield, starch content, tuber shape and size, internal quality (brown spot, hallow, etc.), raw discoloration, cooking and processing quality.
5th	Preliminary yield trial	150	36	Same as in the 4th year.
6th	Yield trial	40	30×3	3 replications. Selection is conducted mainly for yield, starch content, cooking and processing quality. Test for resistance to diseases and insect pests.
7th	Regional trial	10	4 fields	Same as in the 6th year. Identity numbers are given and released to 4 prefectural experiment stations for several tests.
8-10th	Official trial	2-3	8 fields	Same as in the 7th year. Sent to farmers' fields of main producing regions.
11th -	Registration	1		Named, and Norin numbers are given.

明であり、1900年にサットン商会が世間に紹介した。中世の春の村祭りの際に、村娘の中から選ばれる女王（May Queen）に因んでいる。収量性もそれほど優れておらず病害虫にも弱いなど、栽培しやすい品種とは言えないため今日のイギリスでは省みられない。しかし日本では、1960年代から主に関西方面で人気が高くなり、マスコミを通じて全国的に需要が出て栽培が増加し、1984年の21,977 ha（全体の17%）をピークにその後は漸減し2006年には10,269 ha（11.9%）となった。加熱調理すると粒子の細かい粘質の肉で煮崩れが少ない特性に加え、イモの長い形が丸い「男爵薯」と対照的で、明確な区別性が消費者に記憶されている。すなわち、一般には「丸ければ男爵薯、長ければメイクイン」の認識が浸透している。ヨーロッパでは料理の種類ごとに様々な品種が使い分けられていると評論されている。しかし、たとえ様々な種類を店頭に揃えたとしても、日本のバレイショ消費量は欧米諸国に比べ遙かに少ないので、幅広い用途に適性のある新品種を一般消費者に提示できなければ、現状では品物の回転が悪く採算割れとなることが容易に推察できる。

命名登録品種（現：農林認定品種）だけでも、1945年の「農林1号」に始まり、2008年現在で「農林60号」（「はるか」）が登録されている。しかし、「男爵薯」は圧倒的な知名度を持って品種名が消費者に定着し、例外として長い形で煮くずれの少ない「メイクイン」が区別される。このバレイショの代名詞のような2品種以外は、単に無名のバレイショとして扱われることが多く、青果市場ではくずもの扱いとなり単価は安い。新品種がいくら栽培しやすく多収であっても、既存品種と同等の価格で取引されなければ生産者の収益は向上せず、数多くの新品種が「男爵薯」の壁に敗れている。そこで従来の概念からは類推できないほどの衝撃により、消費者の既存イメージを打ち壊し、消費の活性化を狙った品種開発が必要となっている。

したがって、バレイショ育種における第1の課題は、多様化した消費者の需要に対して用途を提示し、既存イメージを打ち壊すことのできるほどの品種を創出することであろう。このような多様な要求に応えるためには、素材とする遺伝資源に十分な遺伝的変異を持っている必要がある。

一方、バレイショ育種における第2の課題は生産における問題、すなわち、シストセンチュウによる被害をどのように回避するかという問題である。バレイショに寄生するシストセンチュウは、ジャガイモシストセンチュウ（*Globodera rostochiensis*）とジャガイモシロシストセンチュウ（*G. pallida*）の2種類が知られており、ヨーロッパ、

南米各国など 50 カ国以上で分布が認められている (Brodie 2001)。わが国では、1972 年に北海道虻田郡真狩村で、初めてジャガイモシストセンチュウの発生が確認された。日本への伝播経路は、1960 年頃に南米ペルーから輸入してテンサイ育苗用床土などに施用していたグアノ (海鳥糞) と共に侵入したと推測されている (稲垣 1984)。その後、1977 年には初発生地から東へ約 300 km 離れた斜里郡清里町でも分布が認められ、1992 年には長崎県でも発生が確認された。さらに 2003 年には青森県、そして 2007 年には三重県でも発生を確認し全国的な広がりとなった。近年は道内でも新規発生の確認が相次いで発生地域の拡大が問題となっており、全国の発生面積は 1 万 ha に達しさらに増加傾向にある。なお、日本で発生しているシストセンチュウはジャガイモシストセンチュウの 1 種でパソタイプ (レース) は Ro1 のみであり、他の種およびパソタイプは確認されていない (串田・百田 2005)。

本センチュウのシスト中には 200~500 個の卵があり、バレイショの根から分泌された物質に反応して孵化し、幼虫が根に侵入する。この卵は経年で約 70% が活性を維持し、孵化するまで 10 年以上も生存してバレイショの根を待ち続ける。根に侵入した幼虫は、ホルモン様物質を分泌してセンチュウ頭部付近に巨大細胞を形成させ、ここから栄養を吸収して成長する。根の内部に寄生した幼虫が養分を吸収するとバレイショの生育は停滞し、高密度圃場では下葉から枯れ上がり収量は半減する。雌成虫は頸部のみを根内に侵入し、球状の虫体の大部分を根面に露出した状態となる。交尾後の雌成虫は体内に卵を形成し、体表は徐々にタンニン化して死に、直径約 0.6 mm のシストを形成する。北海道では 60 日程度で 1 世代を経過する (相場・稲垣 1992)。汚染圃場に抵抗性品種を栽培した場合、卵が孵化して幼虫が根に侵入するまでは罹病性品種と同じである。その後根中に巨大細胞を形成できないため、幼虫は餓死する。このようにしてシスト内の卵を孵化させ幼虫をすべて死滅させることから、抵抗性品種を栽培すると土壤中のセンチュウ密度は大幅に低下する。このため、抵抗性品種はセンチュウからの直接的被害を避けることができるのみならず、圃場を浄化することができることから、育成が急務とされている。

本研究は、このような我が国のバレイショ育種の現状と課題に立脚し、先ず、我が国の既存バレイショ品種や育種母本の遺伝的変異を DNA レベルで明らかにした (第 2 章)。次に、効率的にシストセンチュウ抵抗性品種を作出するための母本系統「R392-50」の育成を行った (第 3 章)。また、従来の「男爵薯」や「メークイン」

のイメージを打ち壊し消費の活性化を狙うため、原産地以外ではほとんど栽培されていない独特の食味と風味を有するアンデス原産 2 倍体栽培種 *S. phureja* の遺伝質を用いた日本で初めての 2 倍体品種「インカのめざめ」（第 4 章）や、肉質部にアントシアニン色素を有する遺伝資源を用いた有色バレイショ品種「インカパープル」および「インカレッド」の育成（第 5 章）、およびその後継品種群の育成（第 6 章）と含有するアントシアニン色素に基づく品種・系統の類別を試み（第 7 章）、今後のバレイショ育種における展望について議論した（第 8 章）。

第2章

DNA マーカー (RAPD) を用いた遺伝資源の評価

【緒論】

品種の正確な遺伝的識別と品種間の遺伝的類縁関係を明らかにすることは、遺伝資源の管理や育種においてもっとも基本的な要件である。バレイシヨは広い適応性を持ち世界各国で何千という品種が育成されてきた。歴史的にも、1900年代初頭より様々な病害抵抗性を付与するため野生種の利用が行われてきた (Ross 1986、Plaisted and Hoopes 1989)。しかし、ほとんどの品種の系譜をたどっていくと「Early Rose」ないしその親品種である「Garnet Chili」に行き当たり (Plaisted and Hoopes 1989)、バレイシヨの持つ遺伝的変異は期待するほど広くは無いかもしれない (Mendoza and Haynes 1974、Love 1999、Simko et al. 2004)。

バレイシヨの日本への渡来は1600年頃にたどることができ (Laufer 1938、星川 1998)、約200年間に渡る鎖国状態を経て、19世紀中頃から欧米品種を積極的に導入するようになった (永田・高瀬 1967)。「男爵薯」や「メークイン」はこの頃導入した品種である。我が国におけるバレイシヨ育種は、公的機関において1902年に始まり、1916年から品種間交雑育種が、そして1939年から種間交雑育種が始まった (Mori 2001)。Hosaka (1993) は、葉緑体 DNA の分析から、我が国の在来バレイシヨ品種 (= 来歴不詳品種) の中で、「紫イモ」、「根室紫」、「蘭谷3号」および「蘭谷5号」と呼ばれて保存されていた系統が A 型葉緑体 DNA を持つことを明らかにした。A 型葉緑体 DNA はアンデス原産4倍体栽培バレイシヨ *S. tuberosum* ssp. *andigena* に典型的な葉緑体 DNA 型で、ヨーロッパでは現存する最古の品種「Myatt's Ashleaf」のみに A 型葉緑体 DNA が確認される (Hosaka and Hanneman 1988) ことから、我が国に残されたこれら4つの品種は、南米アンデスからヨーロッパに持ち込まれた初期のバレイシヨが日本に伝わり、現在まで残存したものであろうと推定している (Hosaka 1993)。

このような歴史的経緯を踏まえた上で、先ず我が国のバレイショ遺伝資源の持つ遺伝的変異を十分に把握し、これからの育種に課せられた課題に取り組むことが肝要であると思われる。

品種を識別し、遺伝的類縁関係を明らかにするための手段として、近年は分子マーカーが用いられている。分子マーカーとして最初に用いられたのは塊茎から抽出したアイソザイムやタンパク質における多型で、電気泳動パターンとして品種間の違いを見ることができる (Desborough and Peloquin 1968、Stegemann and Loeschcke 1976、Oliver and Martínez-Zapater 1985、Douches and Ludlam 1991)。しかし、これらは環境による変動や器官特異性が見られるので一定条件が必要という制約があった。これに代わり、DNA 多型を検出する技術が Restriction fragment length polymorphism (RFLP) 法として登場し、個体間変異を DNA レベルで詳細に分析できるようになった (Beckmann and Soller 1986)。例えば、Görg et al. (1992)は、ヨーロッパの登録バレイショ品種 136のうち 130 を識別できたと報告している。

近年、労力やコストのかかる RFLP 法に代わり、Polymerase chain reaction (PCR) 法を利用した様々な DNA 多型検出法が開発され、バレイショの品種識別に利用されるようになった。例えば、Random amplified polymorphic DNA (RAPD) 法 (Demeke et al. 1993)、Amplified fragment length polymorphism (AFLP) 法 (Kim et al. 1998)、Inter-simple sequence repeat (ISSR) 法 (Bornet et al. 2002)、Simple sequence repeat (SSR) 法 (Provan et al. 1996、Ghislain et al. 2004、2006、Braun and Wenzel 2005、Feingold et al. 2005、Ispizúa et al. 2007) などである。このうち RAPD 法は、1 種類の短い任意配列を持つ 1 本鎖 DNA をプライマーとして PCR を行い、増幅 DNA 産物の電気泳動パターンから多型を示すバンドを検出する方法で (Williams et al. 1990)、最も簡便に DNA 多型を検出する技術として知られ (Rafalski et al. 1991、McGregor et al. 2000)、例えば、ブロッコリーやカリフラワー (Hu and Quiros 1991)、イネ (Fukuoka et al. 1992)、カカオ (Wilde et al. 1992)、セロリー (Yang and Quiros 1993) およびリンゴ (Koller et al. 1993) など様々な作物で品種識別に用いられてきた。

そこで本研究では、RAPD 法を利用することにより、我が国でこれま

で育成された登録品種の識別を試み、併せて、いくつかの欧米品種や在来品種・母本系統を含め、これらの遺伝的多様性を明らかにしようと試みた。

【材料と方法】

供試材料

本研究では 73 の品種・系統を用いた。その内訳は、1992 年までに育成された農林 3 号を除くすべての命名登録品種（カテゴリー1、36 品種）、母本系統（カテゴリー2、8 系統）、在来品種などその他の品種（カテゴリー3、14 品種）、北米品種（カテゴリー4、10 品種）、ヨーロッパ品種（カテゴリー5、3 品種）およびアンデス原産 4 倍性栽培バレイショ *S. tuberosum* ssp. *andigena* の 2 系統（カテゴリー6、ペルーのクスコ市産 CIP 701624 'Amaccaya'、およびボリビアのポトシ市産 CIP 704082 'Malula'）であった。

RAPD 法

ゲノム DNA は Doyle and Doyle (1987)の方法に従って抽出した。

PCR 反応は、サンプル当たり 10 μ l とし、10 ng のゲノム DNA に対して、0.2 μ M RAPD プライマー（任意配列 10 塩基長）、10 mM Tris-Cl buffer (pH 8.3)、50 mM KCl、2 mM MgCl₂、0.001 % gelatin、dATP、dCTP、dGTP および dTTP（Takara）がそれぞれ 100 μ M、および 0.2 units *Taq* DNA polymerase（TOYOBO）となるよう調製した。PCR 反応を進めるため BioOven III（Biotherm Corporation, Arlington, VA, USA）を利用し、設定条件は、始めに 91.5 $^{\circ}$ C で 1 分加温した後、91.5 $^{\circ}$ C で 1 分の熱変性、36 $^{\circ}$ C で 1 分のアニーリング、72 $^{\circ}$ C で 2 分の伸長反応を 1 セットとして 45 サイクル行い、最後に 72 $^{\circ}$ C で 2 分の伸長反応を行った。PCR により増幅された DNA 産物は、TAE buffer（40 mM Tris-acetate と 1 mM EDTA）中で 1.6 %アガロース（LO3、Takara）ゲル電気泳動により分離した。泳動後のゲルを 30-40 分ほど臭化エチジウム（0.08 μ g/ml）で染色し、UV ライト上で写真に記録を納めた。

【結果】

産地別、器官別 RAPD パターン

同一品種の萌芽茎や完全展開葉から抽出した DNA、および産地を異にする（北海道、青森、静岡、長野、兵庫あるいは長崎産）同一品種から抽出した DNA は、同一品種である限り同じ RAPD パターンを示したが、品種が異なれば異なるパターンを示した（Figure 1）。

RAPD バンドの検出

73 品種・系統について、40 種類の RAPD プライマーで PCR を行いその電気泳動パターンを比較した結果、バンドの有無や濃さにおいて多様な変異が見られた（Figure 2）。これらのうち、明瞭にバンドの有無が識別でき、かつ少なくとも 2 つ以上の系統で見られるバンドを RAPD バンドと見なした。9 種類のプライマーは多型を示さなかったかパターンが複雑すぎて読み取れなかったため除いた。残る 31 プライマーはそれぞれ 1～6 の RAPD バンドを検出することができ、合計 84 の RAPD バンドを検出することができた（Table 3）。

命名登録品種の識別

5 つのプライマー（プライマー番号 21、38、41、46 および 72）を用いて検出される 15 の RAPD バンド（Figure 3）の有無に基づき、「紅丸」（1938 年育成）から「ムサマル」（1992 年育成）に至るすべての命名登録品種と、「男爵薯」、「メークイン」および「ツニカ」を識別することができた（Table 4）。

供試全品種・系統の識別

31 プライマーの 84RAPD バンドを用いても、識別できなかったのは 1) 「男爵薯」と「白花男爵」（「男爵薯」の白花突然変異体）、2) 「根室紫」と「紫イモ」、3) 「蘭谷 3 号」と「蘭谷 5 号」、および 4) 「ネオデリシヤス」、「レッドアンデス」（「ネオデリシヤス」の異名同種）、「ジャガキッズレッド 90」および「ジャガキッズパープル 90」（いずれも「ネオデリシヤス」のプロトクローン変異体、岡村ら 1991）であった。その他の品種につ

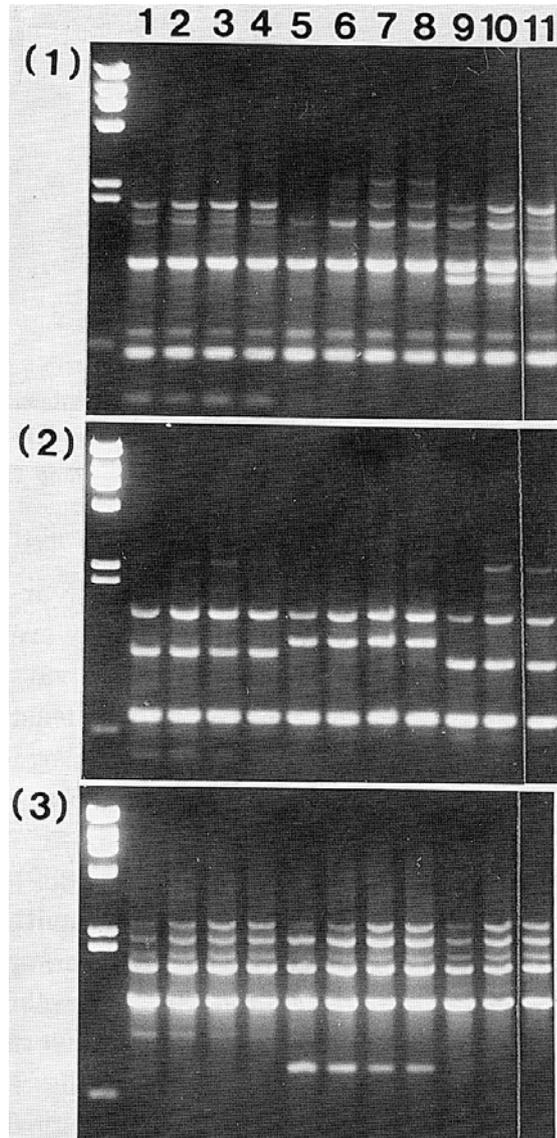


Figure 1. Effects of different source materials for RAPD patterns. DNAs were isolated from cvs. Irish Cobbler (lanes 1 to 4), Norin 1 (lanes 5 to 8) and May Queen (lanes 9 to 11) and amplified with primers (1) No. 21, (2) No. 38, and (3) No. 46. Plant parts and their origins used for DNA isolation were; leaf from Hokkaido (lanes 1, 5 and 9), leaf from Shizuoka (lanes 2 and 6), sprouting bud from Nagano (lanes 3 and 7), sprouting bud from Hyogo (lane 4), sprouting bud from Nagasaki (lanes 8 and 11), and sprouting bud from Aomori (lane 10). The furthest left lane contains *Hind*III digested-lambda DNA.

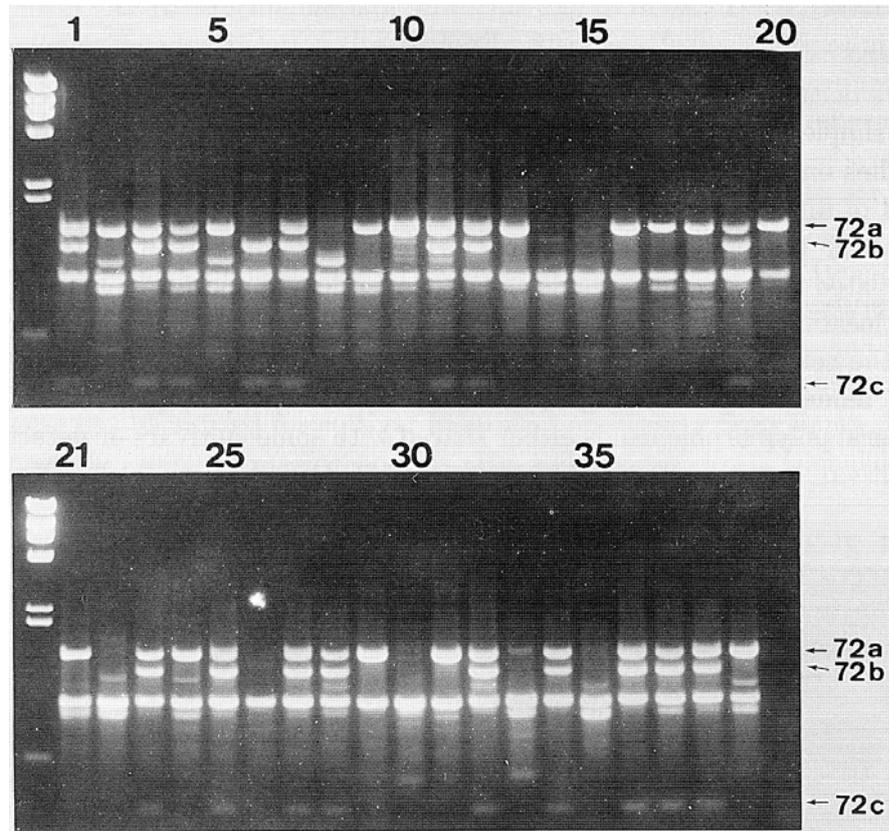


Figure 2. DNA polymorphisms among thirty-nine potato cultivars in Japan revealed by the primer No. 72. Cultivars are in order of Table 4 from left to right and lane number corresponds to code number. Useful bands for cultivar identification are indicated by arrows. The furthest left lane contains *Hind*III digested-lambda DNA.

Table 3 Decamer primers used and number of RAPDs scored.

Primer No.	Sequence (5' to 3')	Source ¹⁾	No. of RAPDs scored
1	TGGTCACTGA	(a)	3
16	TTGTCACTGA	(b)	1
21	TGGTCACCGA	(b)	4
22	TGGTCACGGA	(b)	2
27	TGGTCACTGC	(b)	3
35	TGGTGAATGA	(b)	1
38	TTCGAGCCAG	(c) (OPC-01)	4
39	GTGAGGCGTC	(c) (OPC-02)	3
41	CCGCATCTAC	(c) (OPC-04)	2
46	CTCACCGTCC	(c) (OPC-09)	3
51	TGCGTGCTTG	(c) (OPC-14)	2
61	TCTGGTGAGG	(c) (OPD-04)	2
68	AGCGCCATTG	(c) (OPD-11)	2
72	CATCCGTGCT	(c) (OPD-15)	3
73	AGGGCGTAAG	(c) (OPD-16)	2
84	AGATGCAGCC	(c) (OPE-07)	3
86	CTTCACCCGA	(c) (OPE-09)	4
93	GGTGACTGTG	(c) (OPE-16)	2
95	GGACTGCAGA	(c) (OPE-18)	3
99	CAGGCCCTTC	(c) (=OPA-01)	2
108	GGGTAACGCC	(c) (OPA-09)	2
109	GTGATCGCAG	(c) (OPA-10)	3
115	AGCCAGCGAA	(c) (OPA-16)	3
116	GACCGCTTGT	(c) (OPA-17)	3
118	CAAACGTCGG	(c) (OPA-19)	2
121	TGATCCCTGG	(c) (OPB-02)	2
123	GGACTGGAGT	(c) (OPB-04)	6
125	TGCTCTGCCC	(c) (OPB-06)	1
131	CCTTGACGCA	(c) (OPB-12)	4
193	ACCAGGTTGG	(c) (OPH-14)	4
231	GTCCCGTGGT	(c) (OPJ-12)	3

¹⁾Primers were commercially synthesized by (a) Akitsu Keisoku and (b) TOYOBO, purchased from (c) Operon Technologies Inc. (primer identities given in parentheses), or 4) synthesized by Dr. K. Kosuge, Faculty of Science, Kobe University.

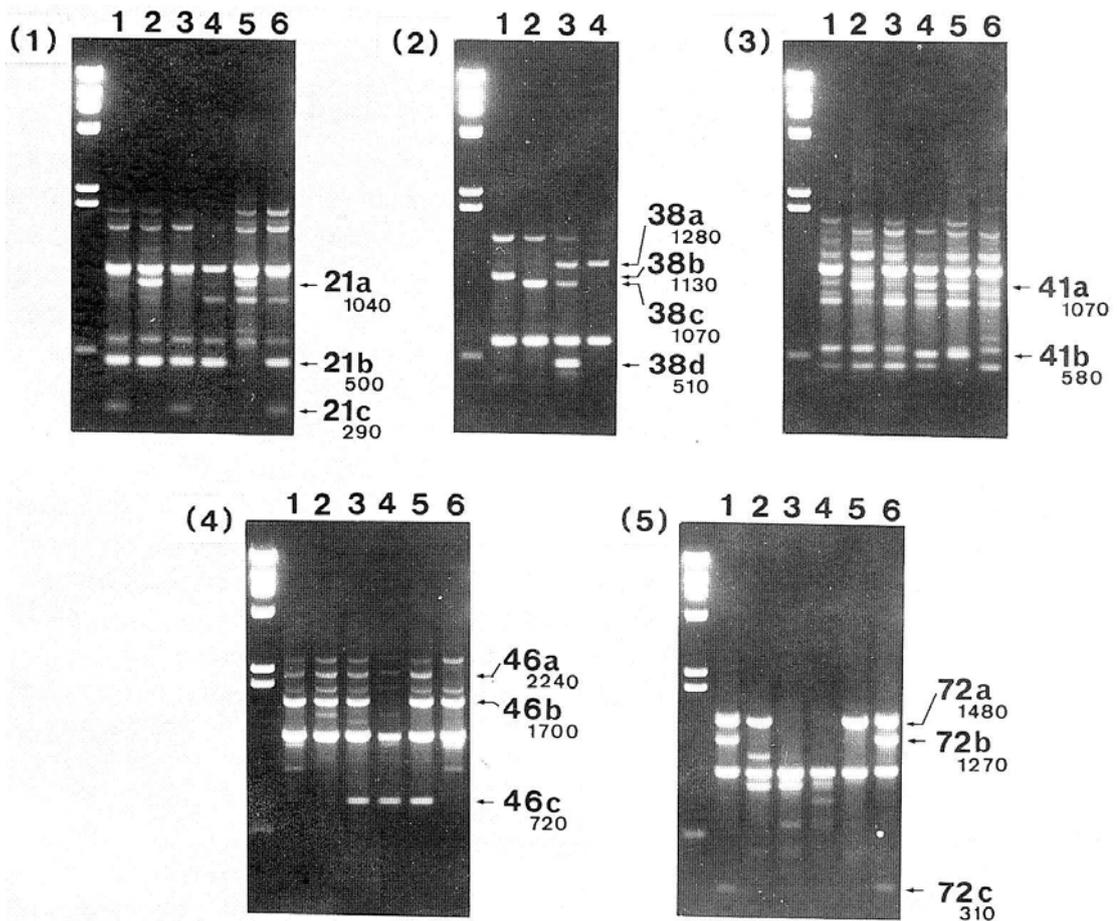


Figure 3. RAPDs useful for cultivar identification. The size of each fragment is given in bp. DNAs from cvs. Irish Cobbler (lane 1), May Queen (lane 2), Yoraku (lane 3), Dejima (lane 4), Setoyutaka (lane 5), and Kita-akari (lane 6) were amplified with primers (1) No. 21, (2) No. 38, (3) No. 41, (4) No. 46, and (5) No. 72. The furthest left lane contains *Hind*III digested-lambda DNA.

Table 4 Identification of Japanese potato cultivars by RAPDs.

Code No.	Cultivar	Released year	RAPDs ¹⁾														
			21a	21b	21c	38a	38b	38c	38d	41a	41b	46a	46b	46c	72a	72b	72c
1	Irish Cobbler	(introduced)	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+
2	May Queen	(introduced)	+	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-
3	Tunika	(introduced)	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
4	Benimaru	1938	-	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+
5	Myojo	1938	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
6	Hokkaishiro	1938	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+
7	Bifukashiro	1942	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	Bifukabeni	1942	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
9	Norin 1	1943	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-
10	Norin 2	1945	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-
11	Chitose	1953	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
12	Oojiro	1954	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
13	Unzen	1955	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-
14	Tachibana	1955	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
15	Yoraku	1958	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
16	Niseko	1959	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-
17	Rishiri	1960	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-
18	Shimabara	1960	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
19	Eniwa	1961	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
20	Yukijiro	1961	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-
21	Chijiwa	1962	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-
22	Hokkai-aka	1965	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-

いては少なくともバンド 6 本以上の違いが見られた。

親子鑑別への試み

供試した品種・系統のいくつかは親子関係にあり、これらの中で RAPD バンドの有無を調査した。「ホッカイコガネ」、「70169-93」および「70169-115」はいずれも「トヨシロ」（母）と「北海 51 号」（父）の F₁ 個体であり、84RAPD バンド中 25 本のバンドの有無に違いが見られた（Table 5）。F₁ 個体間で 23 本のバンドは分離し、2 本のバンドは共通に見られた。これら 25 本のバンドは両親系統のいずれかないし両方に見られ、F₁ 個体でのみ新たに出現するバンドは見られなかった。同様に、親子関係にある「コナフブキ」（「トヨシロ」×「WB66201-10」）、「オオジロ」（「男爵薯」×「農林 1 号」）、「ハツフブキ」（「男爵薯」×「WB61037-4」）、「キタアカリ」（「男爵薯」×「ツニカ」）および「トヨアカリ」（「ツニカ」×「WB61037-4」）についても調査したが、F₁ 個体で見られるバンドは両親系統のいずれかないし両方に見られ、F₁ 個体でのみ新たに出現するバンドは見られなかった。

一方、「Russet Burbank」と「男爵薯」はいずれも「Early Rose」の芽条変異体ないし系統選抜により生じたと言われているが（Plaisted and Hoopes 1989）、「Russet Burbank」は、「Early Rose」と 6 本のバンドで異なり、このうち 2 本は前者にのみ見られた（Table 5）。「男爵薯」においても同様に、「Early Rose」と 15 本のバンドで異なり、4 本が「男爵薯」にのみ見られた（Table 5）。

品種・系統の類縁関係

類縁関係を明らかにするため、それぞれの品種・系統間で異なるバンド数を求め、Ward 法（Ward 1963）によってクラスター分析を行った（Figure 4）。

供試品種・系統は 3 つに大別することができた。第 1 のグループ（Figure 4 では上のクラスター）は主にカテゴリー 1~3 に属する日本の育成品種や在来品種、および「男爵薯」と「ND860-2」からなっていた。第 2 グループ（Figure 4 では中程のクラスター）も、カテゴリー 1~3 に属する多くの育成品種や在来品種の他に、欧米品種の大半がこのグループに属していた。第 3 グ

Table 5 RAPD scores of “Toyoshiro”, “Hokkai 51” and their F₁'s, and those of “Early Rose”, “Russet Burbank” and “Irish Cobbler”. Only those showing polymorphisms among given cultivars are presented.

Cultivars	Score of RAPDs ¹⁾
Toyoshiro (<i>Female parent</i>)	1001111101011111011111100
Hokkai 51 (<i>Male parent</i>)	1110111111110001100010011
Hokkaikogane (F ₁)	1111110011010011010011111
70169-93 (F ₁)	0000001110001101010010000
70169-115 (F ₁)	1110011111001110011100100
Early Rose	01111110110110111011
Russet Burbank	01111101110001111001
Irish Cobbler	10000010001111000110

¹⁾ presence (1) or absence (0).

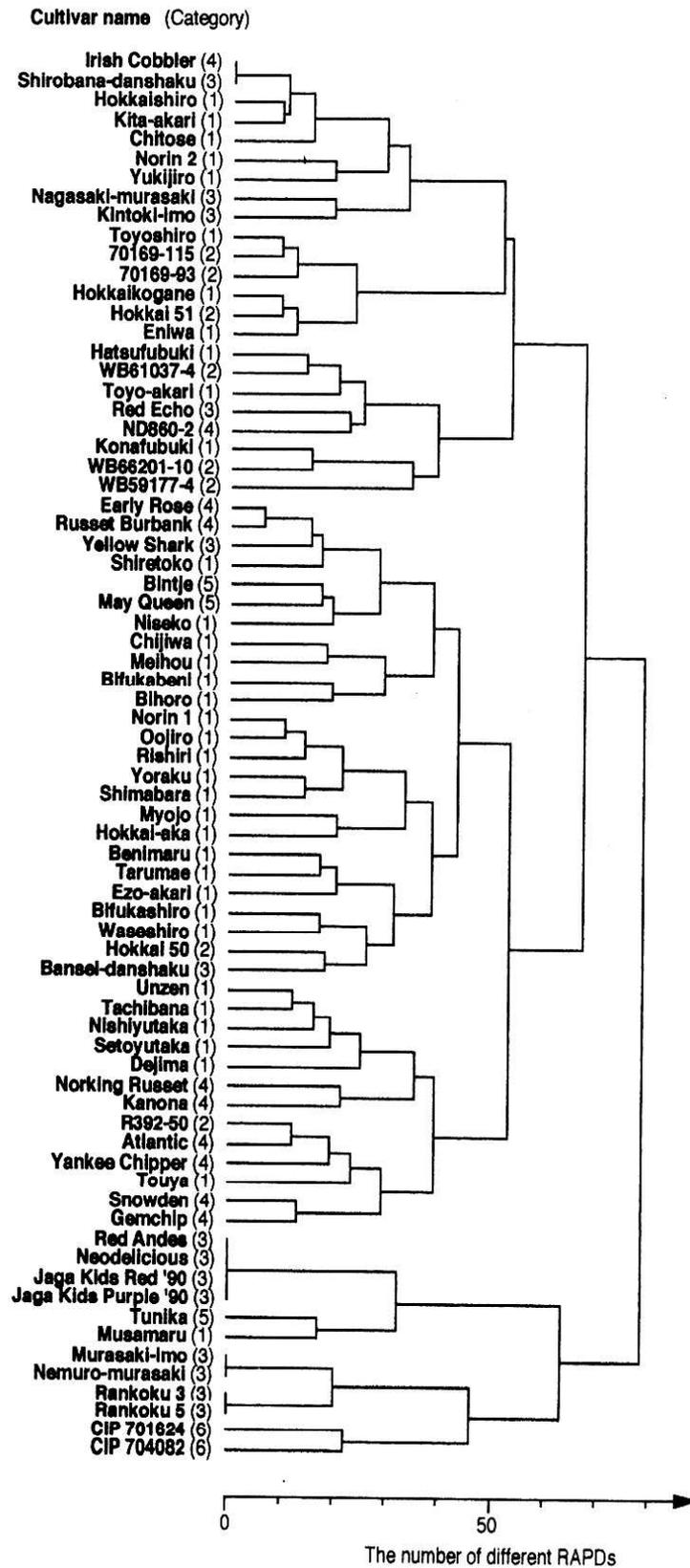


Figure 4. Relationships among potato varieties and breeding lines disclosed by cluster analysis based on the number of different RAPDs. Cultivars are categorized as; (1) varieties officially released in Japan, (2) breeding lines in Japan, (3) others in Japan, (4) North American varieties, (5) European varieties, and (6) *Solanum tuberosum* ssp. *andigena*.

ループ (Figure 4 では下のクラスター) は、さらに 2 つのサブグループ分けることができ、1 つ目のサブグループには「ネオデリシヤス」とその変異体、および、「ツニカ」と「ムサマル」が含まれていた。2 つ目のサブグループでは、古い在来品種である「根室紫」、「紫イモ」、「蘭谷 3 号」および「蘭谷 5 号」が先ず一群となり、次に「*S. tuberosum* ssp. *andigena*」の 2 系統とクラスターが形成された。

先に述べた親子関係にある品種群や、育成過程から考えて遺伝的に近縁であると考えられる品種・系統群、例えば、「ウンゼン」と「タチバナ」(いずれも「農林 1 号」×「Katahdin」の子)、「デジマ」(「北海 31 号」×「ウンゼン」の子) および「ニシュタカ」(「デジマ」×「長系 65 号」の子) は 1 つのクラスターを形成した。

【考察】

RAPD 法の品種識別への有効性

歴史的には、バレイショ品種の識別は、特に可食部である塊茎の形や色、萌芽茎の色、生育習性など、形態的形質や生理的形質に基づき品種の違いが記載されてきた。しかし、環境や生育状況などによってこれらの特性は大きく影響を受けることから、アイソザイムやタンパク質の電気泳動パターンが品種の識別のために使われるようになった (Desborough and Peloquin 1968、Stegemann and Loeschcke 1976、Oliver and Martínez-Zapater 1985、Douches and Ludlam 1991)。例えば、Douches and Ludman (1991) は、13 種類の酵素を支配する 14 酵素遺伝子座から、43 の多型を示すアイソザイムバンドが見られ、これらを利用して 112 北米品種を識別している。日本産品種についてはこのような方法で識別されたことはない。また、品種数は増える一方で、アイソザイム分析に利用可能な酵素遺伝子座の数は限られ、しかもアイソザイムやタンパク質は遺伝子産物であるため、環境による発現の違いや、器官特異性、あるいは齢や栄養状態などの内的要因によって大きく変動する可能性がある (Stegemann et al. 1973、Hosaka et al. 1985)。一方、DNA は不変性を持ち、本研究で明らかにしたように、DNA を抽出する部位を違えても、あるいは異なる生育環境を

持つ産地であっても、一定のバンドパターンを得ることができた。

本研究では 84 本の RAPD バンドによって 73 の供試品種・系統のうち 67 を他と明確に識別することができた。さらに、命名登録品種 39 品種に限れば、5 プライマーの 15 バンドですべてを識別することができた。36 の北米品種が 2 つのプライマーで識別可能という報告 (Demeke et al. 1993) もあり、RAPD 法は、簡便かつ正確に品種を識別するための有効な手段であると考えられる。

系統関係

本研究で識別できなかったのは、異名同系統と考えられる在来品種の一群、および親品種とその体細胞突然変異体であった。バレイショでは自然に生ずる芽条変異体は体細胞突然変異体として知られ、「男爵薯」の白花変異体である「白花男爵」は識別することができなかった。しかし、「男爵薯」が晩生化したと考えられていた「晩生男爵」は、明らかに異なっていた。バレイショの栽培圃場において自殖や自然に起こった交雑によって実をつけることは珍しいことではない。しかし、「男爵薯」は花粉不稔であり、「晩生男爵」には「男爵薯」に見られないバンドが見られたことから、自殖よりもむしろ自然に他品種の花粉が受粉され、「晩生男爵」ができたものと推定される。

「Russet Burbank」は、「Early Rose」の放任受粉より得られた植物体の系統選抜により「Burbank」が育成され、さらに「Burbank」の芽条変異体として「Russet Burbank」ができたと考えられ、「男爵薯」は「Early Rose」の芽条変異体と考えられてきた (Plaisted and Hoopes 1989)。しかし、Douches et al. (1991) はアイソザイム分析の結果から、これらの由来について疑義を呈し、その由来は未定としている。少なくとも、「Burbank」には「Early Rose」にならないアイソザイムバンドが見られたことから、交雑由来と考えられ (Douches et al. 1991)、本研究結果も、「Russet Burbank」と「男爵薯」のいずれも「Early Rose」に見られない RAPD バンドが見られることから、これらは雑種起原と考えられる。

「ネオデリシャス」は、異名同系統である「レッドアンデス」、およびプロトクローン変異体と識別することができなかった。これは逆に、本研究がこれら品種群が異名同系統であり、体細胞突然変異体であることを証明する

こととなった。

日本産品種の遺伝的多様性

本研究で得られたデンドログラム (Figure 4) を、それぞれの品種の系譜と比較すると、遺伝的に近縁関係にあるものはデンドログラムでも近くにクラスターを形成した。すなわち、異名同品種やほとんど同一の遺伝子組成を持つ芽条変異体は同一の RAPD パターンを示し、系統選抜や交雑により育成された品種は親系統に近い傾向が見られた。したがって、RAPD バンドの有無に基づく類似性は、いくつかの作物で既に明らかにされているように遺伝的類似性を反映しているものと考えられる (Kresovich et al. 1992、Vierling and Nguyen 1992、Dweikat et al. 1993、Joshi and Nguyen 1993、Stiles et al. 1993、Tinker et al. 1993、Wilkie et al. 1993、Williams and St Clair 1993)。

「ND860-2」を除く最近の北米品種 (「Norking Russet」、 「Kanona」、 「Atlantic」、 「Yankee Chipee」、 「Snowden」 および 「Gemchip」) は、第 2 グループ内の 1 つのクラスターにまとめられ、互いに近縁であることを示唆している。これは供試品種が少なかったためと、加工用品種だけを分析したためかもしれない。近年育成された北米品種は程度の多少はあれ、野生種の遺伝質が育成過程で取り込まれているので (Plaisted and Hoopes 1989)、多様な遺伝的変異が期待されるが、一方で、Mendosa and Haynes (1974) は、北米品種の遺伝的多様性が極めて小さいことを指摘しており、少なくとも加工用品種については思ったほど遺伝的多様性は大きくないことを本研究結果は示している。

北米品種が 1 つのクラスター内に包含されたとは言え、その中には多くの長崎育成品種が含まれた。また、グループ 1 と 2 の違いはそれぞれに含まれる品種の特徴を表したものは考えられなかった。これは、一旦公表された品種が次は母本系統として使われ、外国品種も同様に次の育成品種の母本として頻繁に使われたため、大きな遺伝子プールができているものと類推される。例えば、36 の命名登録品種について見ると、外国品種が直接の片親として使われた回数は「男爵薯 (=Irish Cobbler)」が 8 回、「ペポー (=Pepo)」が 5 回、「ツニカ (=Tunika)」が 4 回、「Hochprozentige」と「Katahdin」がそれぞれ 2 回使われ、その他にも「Lembke Frühe Rosen」、 「Deodara」、

「Mirabilis」、「Gineke」、「Kennebec」および「Priekulsky Ranny」が1回ずつ使われている。さらに、野生種に由来する遺伝質が頻繁に育種母本の中に取り込まれているので（入倉 1968）、結果として我が国の育成品種は多様な遺伝的変異を持つものと考えられる。

グループ3は比較的明瞭なグループと考えられる。系譜から「ネオデリシャス」はその遺伝子組成の1/3はアンデス原産2倍体栽培種 *S. phureja* に由来している（富田・川上 1989）。「ツニカ」はアンデス原産4倍体栽培バレイショ *S. tuberosum* ssp. *andigena* に由来するシストセンチュウ抵抗性遺伝子 H_1 を持ち（Ross 1986）、抵抗性を付与するための育種母本として使われている（Mori et al. 2007、森 2009）。古い在来品種である「根室紫」、「紫イモ」、「蘭谷3号」および「蘭谷5号」は *S. tuberosum* ssp. *andigena* に典型的なA型葉緑体DNAを持つことから、南米アンデスからヨーロッパに持ち込まれた初期のバレイショが日本に伝わり、現在まで残存したものであろうと推定されているが（Hosaka 1993）、本研究結果でも正しく ssp. *andigena* とクラスターを形成した。したがって、グループ3はアンデス原産栽培バレイショの影響を色濃く残した一群であると特徴づけることができる。

以上をとりまとめると、我が国のバレイショは、ヨーロッパにもたらされた初期のバレイショから、「男爵薯」を基幹的な遺伝的背景とし、アンデスの栽培種や野生種の遺伝質を取り込み高度に改良された品種に至るまで、全体として見ると非常に遺伝的多様性に富んだ遺伝子プールを形成しているものと考えられる。

第 3 章

ジャガイモシストセンチュウ抵抗性母本系統

「R392-50」の育成

【緒論】

アンデス原産 4 倍体栽培バレイショ *S. tuberosum* ssp. *andigena* に由来する単一優性遺伝子 H_1 は、ジャガイモシストセンチュウ (*Globodera rostochiensis*) のパソタイプ (レース) Ro1 に対して完全な抵抗性を示すことが知られている (Ross 1986)。

1971 年に旧東ドイツから導入した「Tunika」と「Skutella」をはじめとして、「Prevalent」、「Ehud」、「Mara」および「Prominent」などの抵抗性品種が海外から導入され、生育特性と生産力を評価すると共にセンチュウ発生地帯における適応性が検討された。これにより「Tunika」は H_1 遺伝子を持ち、センチュウ発生地帯の主要品種「紅丸」および「農林 1 号」に代わるでん粉原料用抵抗性品種として認められ、1978 年「ばれいしょ導入 3 号」として登録され、「ツニカ」と命名されると共に北海道における奨励品種に採用された (西部・稲垣 1980)。しかしセンチュウ発生地帯でもあまり普及せず、1982 年の 69 ha を最高に栽培面積はその後減少した。

「Tunika」を母本とする交配からは比較的優良な後代が得られ、本センチュウに抵抗性を有する多数の優良品種が育成された。「トヨアカリ」は初めての抵抗性品種で、「ツニカ」より高でん粉多収のでん粉原料用品種である。「キタアカリ」は黄色粉質の肉質で高ビタミン C の青果用品種、「エゾアカリ」は黄白色粘質の肉質で煮崩れず煮物に向く青果用品種、「ムサマル」はフライ適性の優れる加工食品用である。さらにでん粉原料用の「サクラフブキ」は、「トヨアカリ」を父とする育成品種である。

ところで、1972 年以降の約 20 年間は、シストセンチュウ抵抗性の導入を最優先としたため、それ以前の育成系統に比べ収量水準が劣るばかりでなく、塊茎の外観や調理品質、油加工適性およびでん粉品質など利用特性もやや劣っていた。このため国産品種育成に加え、需要構造の変化に対応して利用特性を考慮した H_1 遺伝子を持つ外国品種が導入された。ポテトチップ原料用として「アトランチック (=Atlantic)」と「ヤ

ンキーチップパー (=Yankee Chipper) 」が導入され、「紅丸」タイプの離水率の低いでん粉原料用として「アスタルテ (=Astarte) 」が導入された。また、当初はでん粉原料用として導入された「プレバレント (=Prevalent) 」は、独特の食味を有する青果用として斜里地域の特産品種向けに導入された。

稲垣 (1980) によれば、「Tunika」や「Skutella」などの抵抗性品種と感受性品種の後代における抵抗性個体出現率は、交配組み合わせにより 16.7%から 60.8%まで変動したが平均は 45.4%であった。これから推測して抵抗性と感受性とはほぼ 1 対 1 に分離するものと考えられ、抵抗性遺伝子型は一重式 ($H_1h_1h_1h_1$) と考えられた。これは初期世代で半数以上を棄却することを意味し、選抜効率の向上が望まれた。抵抗性遺伝子が二重式 ($H_1H_1h_1h_1$) の「Hudson」 (Plaisted et al. 1973) と一重式 ($H_1h_1h_1h_1$) の「Wauseon」の交配種子集団 (R392 系統群) をアメリカ合衆国コーネル大学から導入し、抵抗性を調査した所、91.4%の個体が抵抗性であった (稲垣 1980)。

$H_1H_1h_1h_1 \times H_1h_1h_1h_1$ の後代で期待される遺伝子型分離頻度は、Random chromosome assortment model に従うと $1 H_1H_1H_1h_1 : 5 H_1H_1h_1h_1 : 5 H_1h_1h_1h_1 : 1 h_1h_1h_1h_1$ であり (Allard 1960)、この結果、表現型分離比は $11 H_1 : 1 h_1$ 、すなわち 91.7%が抵抗性となることが期待され、これは調査結果とよく一致していた。また、三重式 ($H_1H_1H_1h_1$) や二重式遺伝子型個体 ($H_1H_1h_1h_1$) が出現する頻度はそれぞれ 8.3%と 41.7%が期待された (Allard 1960)。

仮に三重式遺伝子型個体を親系統とし感受性個体に抵抗性を導入しようとする、 $H_1H_1H_1h_1 \times h_1h_1h_1h_1$ の後代で期待される表現型分離頻度は、Random chromosome assortment model に従うと 100%抵抗性となり、Random chromatid assortment model に従っても 96.4%以上が抵抗性となる (Allard 1960)。そこで本研究では R392 系統群から農業形質に優れた三重式遺伝子型個体の選抜を試みた。

【材料と方法】

植物材料と遺伝分析

R392 系統群 (「Hudson」 \times 「Wauseon」) について常法の育種法に従い (第 1 章参照) 個体選抜、系統選抜を経て実用形質に優れた 30 系統を選抜した。このうちの 12 系統について感受性品種「トヨシロ」ないし「北海 62 号」と交配し、実生幼苗を用

いて抵抗性の有無を調査した。この結果に基づき二重式および三重式遺伝子型個体と判定された個体はさらにこれを確認するため、一重式遺伝子型個体である「北海 64 号」や、相互間で交配し実生幼苗を用いて抵抗性の有無を調査した。

シストセンチュウ抵抗性検定

シストセンチュウに対する抵抗性は、ポットに養成した実生幼苗にシストセンチュウを接種することにより行った。まず分離したシストを砕いてシストセンチュウの卵・幼虫を集め、バレイショ栽培土壌浸出液を孵化液としてこれに浸漬し 10 日間 22 °C で培養した。培養後、卵・幼虫が 200 個体以上になるよう 10 ml の懸濁液を調製しこれを土壌に接種した。接種後 7~8 週目に植物体の根に雌成虫の寄生が認められなかった個体を抵抗性個体と判断した。

【結果および考察】

R392 系統群の各系統と感受性品種「トヨシロ」ないし「北海 62 号」の後代集団における抵抗性個体出現頻度は、36.7%から 95.5%で変異し、その程度により 3 群に分けることができた (Table 6)。第 1 群は 36.7%から 46.2%で変異する集団で、第 2 群は 74.5%から 91.5%で変異する集団、そして第 3 は 94.5%を示した「R392-25」と 95.5%を示した「R392-50」からなる集団である。これら 3 群は Random chromosome assortment model ないし Random chromatid assortment model から期待される抵抗性個体の出現頻度からそれぞれ一重式 ($H_1h_1h_1h_1$)、二重式 ($H_1H_1h_1h_1$) および三重式 ($H_1H_1H_1h_1$) 遺伝子型個体と考えられた。また、二重式遺伝子型個体と推定された「R392-27」と三重式遺伝子型個体と推定された「R392-50」に対して一重式遺伝子型個体「北海 64 号」を交雑すると、後代集団ではそれぞれ 92.0%と 98.5%の抵抗性個体が得られ、それぞれの組合せに期待される抵抗性個体出現頻度 (前者では 91.7%ないし 88.5%, 後者では 100%ないし 98.1%) にほぼ一致した結果が得られた (Table 6)。同様に、二重式遺伝子型個体「R392-27」と三重式遺伝子型個体「R392-50」の交雑では 97.6%の抵抗性個体が得られ、期待頻度である 100%ないし 99.2%に近い出現率であった (Table 6)。

三重式遺伝子型個体を片親として感受性個体に交配すると、その後代において

Table 6 Genetic segregation of resistant (R) vs. susceptible (S) to cyst nematode in the R392-derived progeny and the estimated resistance genotypes.

Cross combination	No. of plants		Freq. of R (%)	Expected freq. of R ¹⁾		Estimated genotype
	R	S		I	II	
Toyoshiro × R392-6	55	95	36.7	50.0	46.4	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1h_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-13	80	119	40.2	50.0	46.4	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1h_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-36	92	107	46.2	50.0	46.4	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1h_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-3	180	53	77.3	83.3	78.6	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-11	175	25	87.5	83.3	78.6	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-12	177	23	88.5	83.3	78.6	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-26	149	51	74.5	83.3	78.6	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-27	170	28	85.9	83.3	78.6	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-53	183	17	91.5	83.3	78.6	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1h_1h_1$
R392-72 × Hokkai 62	16	4	80.0	83.3	78.6	$H_1H_1h_1h_1 \times h_1h_1h_1h_1$
Toyoshiro × R392-25	189	11	94.5	100.0	96.4	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1H_1h_1$
Toyoshiro × R392-50	191	9	95.5	100.0	96.4	$h_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1H_1h_1$
Hokkai 64 × R392-27	184	16	92.0	91.7	88.5	$H_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1h_1h_1$
Hokkai 64 × R392-50	197	3	98.5	100.0	98.1	$H_1h_1h_1h_1 \times H_1H_1H_1h_1$
R392-27 × R392-50	206	5	97.6	100.0	99.2	$H_1H_1h_1h_1 \times H_1H_1H_1h_1$

¹⁾ Based on (I) Random chromosome assortment model or (II) Random chromatid assortment model.

少なくとも 96.4%の高頻度で抵抗性個体の出現が期待される (Allard 1960)。したがって、実生世代でのセンチウ抵抗性検定を省略し、生産力検定予備試験終了後に抵抗性の確認の検定を行うのみで実用上十分と考えられる。このため、特に農業形質に優れた「R392-50」を母本系統として発表した (森・西部 1987)。なお、本系統の後代からは、「とうや」 (1992 年育成)、「ベニアカリ」 (1994 年育成)、「さやか」 (1995 年育成)、「アーリースターチ」 (1996 年育成)、「花標津」 (1997 年育成) など多数の優良品種が育成された。

第4章

2倍体遺伝資源を用いた橙黄肉色の2倍体バレイショ品種 「インカのめざめ」の育成

【緒論】

バレイショ原産地の南米アンデス地域では、大粒の塊茎で生産力の高い4倍体栽培バレイショ *S. tuberosum* ssp. *andigena* (大粒種) ばかりでなく、小粒の塊茎で様々な色と形をした2倍体の栽培種 *S. stenotomum* と *S. phureja*、および3倍体の栽培種 *S. chaucha* (小粒種) が、先住民の血を濃く受け継ぐ人たちを中心に現在も栽培されている (山本 2004)。この小粒種は独特の食味とナッツ類のような風味を有することから、大粒種とは区別して特別に高値で取り引きされ、普段の食事では大粒種を食べてもハレの食事には小粒種を供している (梅村 1984)。

これらアンデス原産2倍体栽培種や3倍体栽培種は独特の食味と風味を有するものの、短日日長条件によって塊茎の形成が誘導されるため、我が国の春夏作では収量性が大きな問題となる。そこで本研究では、これら2倍体栽培種の独特な食味と風味を残しつつ、日本のような長日日長条件でも栽培できるように品種育成を行った。

【材料と方法】

親系統

父本系統は、高タンパク含量を目的にして国際バレイショセンター (ペルー) から導入された橙黄肉色の2倍体雑種系統「P10173-5」であり、母本系統は、アメリカ品種「Katahdin」の2倍性半数体「US-W1」と *S. phureja* 「114」の2倍体雑種系統群から選抜された長日適応性に優れ塊茎形成能力が高い「W822229-5」を用いた (Figure 5)。

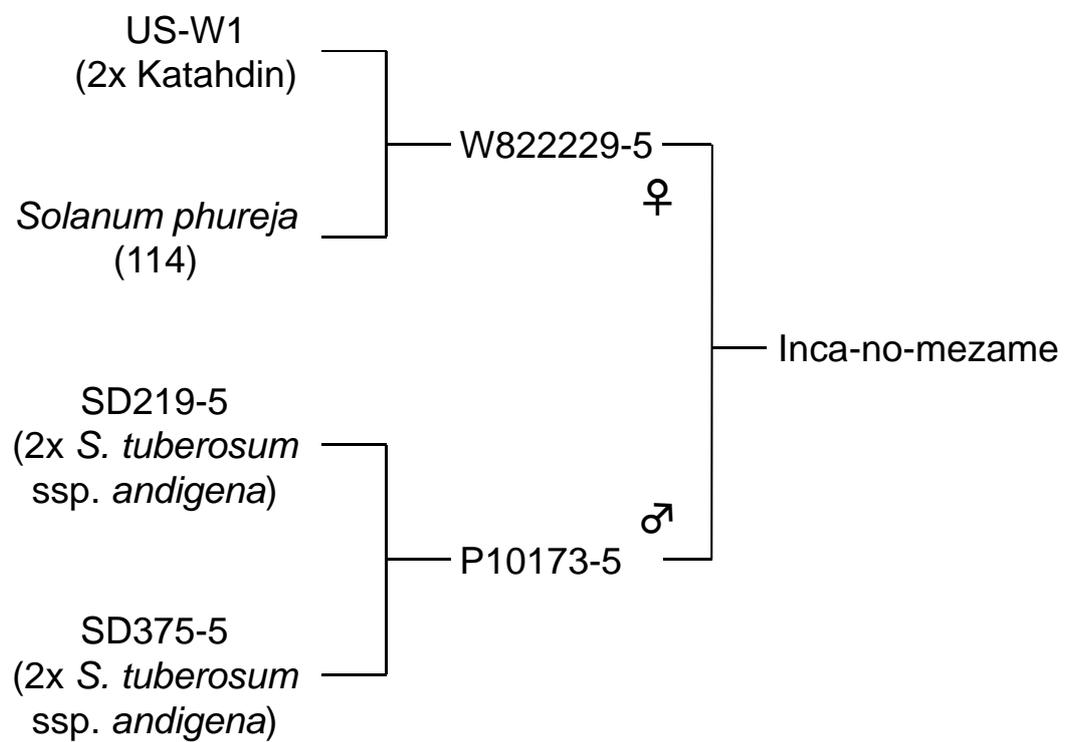


Figure 5. Pedigree of a newly bred variety “Inca-no-mezame”.

育種方法

北海道農業試験場ばれいしょ育種研究室（恵庭市島松）（現：北海道農業研究センター）において常法の育種法（第1章参照）に従って行った。1997年4月にばれいしょ育種研究室の所在地を畑作研究センター（現：芽室研究拠点、河西郡芽室町）へ移転した後も特性検定試験および系統適応性検定試験などを継続した。

栽培特性調査

特性調査は慣行基準に従い、北海道農業研究センター（河西郡芽室町）における2000年から2002年の3カ年の平均値を比較した。特性調査における10a当たり施肥量は、Nが6.0 kg、P₂O₅が17.0 kg、K₂Oが10.2 kgおよびMgOが5.1 kgとした。5月上旬に畦間75 cm、株間30 cmで種イモを植付け、9月上旬に収穫した。20 g以上のイモを上イモとし、総収量を求めた。また、60 g以上のイモ収量をもって規格内収量とした。でん粉価（%）は（比重-1.05）×214.5+7.5で算出した。塊茎の休眠調査は、10月下旬から暗所18℃で保管し、芽が5 mm以上に達した時を休眠明けとして、茎葉黄変期からの日数を休眠期間とした。休眠期間は標準品種との比較で判定し、30日未満は「ごく短」とした。

塊茎の品質特性調査

イモの肉色は、北海道農業研究センターで2004年8月末に収穫したイモ5個について、色彩色差計（ミノルタCR-300）によりイモ当たり2点測定を行い、平均ハンター（L*、a*、b*）表色値により比較した。

カロテノイド系色素量（μg/100 g生イモ）は、3個の生イモをそれぞれ1 mmにスライスし、99.5%エタノールに浸漬して暗所に12時間4℃で静置することにより抽出し、高速液体クロマトグラフィー（HPLC）分析法により定量した。用いたカラムはProdisy 5μ ODS3（Phenomenex、CA、USA）で、検出波長は420 nmであった。

成分分析は、1998年と1999年に北海道農業研究センターで8月末に収穫したイモを女子栄養大学に依頼して行い、2カ年の平均値を求めた。

細胞の大きさは、2005年産のイモのうちでん粉価の中央値を示す3個を用い、維管束環外付近から内髓の柔組織貯蔵細胞について実体顕微鏡で撮影した写真画像から円近似直径を測定した。

糖含量の変動は、収穫後 18 °C の暗所に置き 2 週間 curing させた後、4 °C で保存したものを経時的に、Matsuura-Endo et al. (2004) による HPLC 法に従って調査した。

【結果】

育成の経過

1988 年 7 月に「W822229-5」を母として 64 花に「P10173-5」の花粉を授粉し、12,297 粒の種子を得た。1989 年に、得られた種子から育成した 896 個体から長日長条件下で塊茎形成する黄肉色の 80 個体を選抜した（実生個体選抜）。以下、1990 年の個体二次選抜により 21 個体に、1991 年の系統選抜により 9 個体に、1992 年の生産力検定予備試験で 4 個体に、1993 年の生産力検定試験で 3 個体に、そして 1994 年の生産力検定試験で 1 個体に絞られ「島系 575 号」の育成地番号を付した。

4 倍体普通品種に比べ収量は劣り、塊茎の休眠が短く貯蔵性に劣るが、その橙黄肉色と食味品質は際だって優れていたため、1997 年に種苗法に基づき「インカのめざめ」として品種登録の申請を行った。2002 年に優良な特性として肉色と食味品質の新規性が認められ、農林水産省として普及させるに足ると判断され、「ばれいしょ農林 44 号」として命名登録された。

栽培特性

「インカのめざめ」の主要特性を Table 7 に示した。「男爵薯」に比べ萌芽期はやや遅いが、開花期はやや早く、熟期は茎葉黄変期が 1 週間以上早い極早生であった。花の色は「男爵薯」より青味が強い紫系で、花数は少なかった。そう性（草型）はやや開張型で茎は細く小葉は小さく、どの生育段階でも「男爵薯」より地上部が小さかった。「男爵薯」に比べ、株当たりのイモ数は多い（13.2 個）が塊茎の平均 1 個重が小さい（50 g）ため、10 a 当たり収量は、「男爵薯」の 4,230 kg に比べ、70%に満たない 2,900 kg であった。でん粉価は「男爵薯」より 3%程度高く 18.3%となり乾物率は高かった。「男爵薯」は 7 月下旬から 8 月上旬にかけて塊茎の肥大が進み上イモ重が増加するが、「インカのめざめ」は平均 1 個重が 60 g を超える規格内イモ重の比率が少ないため上イモ重は低く推移した。

なお、通常の収穫機では 20 g 程度以下の小イモは掘り残しとなり、手作業によ

Table 7 Characteristic performance of “Inca-no-mezame” in comparison with “Irish Cobbler” and “Kita-akari” (mean in 2000-2002).

Characteristics	Inca-no-mezame	Irish Cobbler	Kita-akari
(1) General appearance			
Vine shape	slightly spreading	semi-erect	semi-erect
Stem thickness	thin	medium	medium
Leaflet size	slightly small	large	slightly large
Flower color	purple	reddish-purple	reddish-purple
Stem length	46 cm	39 cm	45 cm
No. of stems per hill	7.6	4.1	3.1
(2) Agronomic performance			
Emergence date	May 29	May 26	May 24
Flowering date	June 27	June 29	June 29
Senescence date	August 21	August 30	August 27
No. of marketable tubers per hill	13.2	12.2	12.8
Mean tuber weight	50 g	78 g	81 g
Total yield per 10 a	2,900 kg	4,230 kg	4,596 kg
Marketable yield per 10 a	1,378 kg	3,405 kg	3,868 kg
Starch content	18.3%	15.3%	15.7%
(3) Tuber character			
Tuber shape	ovate	round	flattened round
Eye depth	shallow	deep	medium
Skin texture	smooth	medium	slightly rough

Skin color	buff	creamy white	creamy white with red eye
Flesh color	yellowish-orange	white	light yellow
Tuber dormancy period	very short	slightly long	medium
(4) Cooking quality			
Darkening after peeling	almost none	medium	slight
Sloughing after boiling	slight	moderate	moderate
Texture after boiling	very smooth	slightly rough	slightly rough
Mealiness after boiling	moderate	slightly mealy	slightly mealy
Taste after boiling	very excellent	excellent	excellent
Chip quality	acceptable	not acceptable	not acceptable
(5) Disease and pest response			
Cyst nematode	susceptible (h ₁)	susceptible (h ₁)	highly resistant (H ₁)
Late blight	susceptible	susceptible	susceptible
Powdery scab	resistant	susceptible	moderately susceptible
Bacterial wilt	resistant	highly susceptible	susceptible
Potato virus Y	susceptible	susceptible	susceptible

る回収や翌年に掘り残した塊茎から生育した野良生えの処理に労力を要した。また、塊茎の休眠期間が極短く茎葉が枯凋したら直ぐに休眠明けとなるので、芽の伸びを抑制するためには収穫直後からの低温貯蔵など特別な取り扱いが必要であった。

塊茎特性

「インカのめざめ」の塊茎は卵形をしており (Figure 6)、皮色は黄褐で肉色は橙黄 (濃黄) である。肉色を色彩色差計により測定しハンター表色値により比較すると、黄色の濃さを表す b^* 値は「男爵薯」の 15.9 や淡黄肉品種「キタアカリ」の 25.7 に比べ、「インカのめざめ」の 54.9 は明らかに高く黄色味が濃かった。

白肉品種の「男爵薯」は、ゼアキササンチン (Zeaxanthin) やルテイン (Lutein) など黄色のカロテノイド系色素をほとんど含まなかった (Table 8)。一方、淡黄肉色品種の「キタアカリ」はカロテノイド系色素を生イモ 100 g 当たり 155.3 μg 含有するが、「インカのめざめ」は生イモ 100 g 当たり 453.8 μg 含有し、約 3 倍の含量であった。

「インカのめざめ」の橙黄肉色は、どの様な調理でも安定した色調を示し、彩りの優れる調理品が得られた (森 2003)。また、「インカのめざめ」が含有するゼアキササンチンは活性酸素消去能を示し、同量の β カロチンよりもリノール酸メチルの過酸化生成を抑制する能力が高かった (Ishii et al. 1999)。

「インカのめざめ」の生イモ 100 g 当たりのタンパク質含量は、「男爵薯」や「キタアカリ」より 1.5~1.7 倍多く 2.91 g であり、同様に脂質含量は、「男爵薯」や「キタアカリ」の約 2 倍に相当する 0.21 g であった。炭水化物と灰分は他と大差はなく、それぞれ 18.0 g と 1.04 g であった。

「インカのめざめ」の細胞の大きさは、円近似の直径で表すと 144 μm (標準偏差 16.9) であり、「男爵薯」 (171 μm) や「キタアカリ」 (202 μm) に比べ小さく、体積比に換算すると「男爵薯」の約 60%、「キタアカリ」の約 36% であった。塊茎の細胞が小さいほど煮崩れが少ない (Matsuura-Endo et al. 2002) ため、「インカのめざめ」はでん粉価は比較的高いが水煮時の煮崩れ程度は少なく、普通品種に比べ滑らかな質感があると推測される。

「インカのめざめ」は塊茎の休眠が極短いため貯蔵中の萌芽が早く、これを回避して品質劣化を防ぐために収穫後すぐに低温貯蔵される。2~4 $^{\circ}\text{C}$ の低温貯蔵すると、「男爵薯」のような普通品種はブドウ糖と果糖の還元糖が増加し、ショ糖は生イモ 1 g 当たり 2 mg 程度までしか増加しない。ところが「インカのめざめ」は、ブドウ糖と果



Figure 6. Tuber morphology of a newly bred variety “Inca-no-mezame”, in comparison with “Irish Cobbler” and “Kita-akari”.

Table 8 Carotenoid content ($\mu\text{g}/100$ g fresh weight) of “Inca-no-mezame” in comparison with those of Irish Cobbler and Kita-akari.

Variety	Zeaxanthin	Lutein	Other	Total
Inca-no-mezame	427.0	15.3	11.5	453.8
Irish Cobbler	12.6	0.0	0.0	12.6
Kita-akari	36.4	38.8	80.1	155.3

糖の還元糖の増加程度は少なく、ショ糖が生イモ 1 g 当たり 10 mg 以上まで増加し明らかな甘みを感じた (Figure 7)。普通品種では低温にさらされると酢酸インベルターゼ活性が増加してショ糖を分解して還元糖が生成される。しかし、「インカのめざめ」では本酵素が働かず、スクロースリン酸シンセターゼ活性が増加して還元糖からショ糖が合成されるため、他の品種とは異なりショ糖が高濃度に増加した (Matsuura-Endo et al. 2004)。

「インカのめざめ」は、生イモの皮をむいて空気中に放冷すると変色する剥皮後褐変や調理加熱後に放冷すると調理品が黒変する調理後黒変ともに少なかった。舌ざわりは滑らかで、食味は「男爵薯」より優れる「上」と評価され、また油を用いた加工適性も高かった (Table 7)。水煮、蒸しおよびフライなどの基本的な調理を実施したところ、色あせることなく安定した色調を示し、橙黄色の彩りに優れる調理品が得られた。蒸しやフライ調理の適性は高く、独特の風味を有し、パネラーによる官能試験で良い評価が得られた (Figure 8)。「男爵薯」や「キタアカリ」に比べ、肉色と甘味の評点が高く、香りは「キタアカリ」と同様になり、舌ざわりは評価が分かれた。これまでのバレイショとは異なる用途として、滑らかな質感と甘みを生かしたモンブランやスイートポテトなどの菓子類が試作され、デザート食材としても検討され高い評価が得られた。

病虫害抵抗性

「インカのめざめ」は、「男爵薯」と同様に国際検疫上の重要センチュウであるジャガイモシストセンチュウ抵抗性を有せず、ジャガイモ疫病 (*Phytophthora infestans*) にも弱かった (Table 7)。「男爵薯」は粉状そうか病 (*Spongospora subterranea*) と青枯病 (*Ralstonia solanacearum*) に弱い、「インカのめざめ」は強度の抵抗性を有していた。

【考察】

本研究では、「男爵薯」のような 4 倍体普通品種とは異なり、2 倍体栽培種を利用することにより日本で初めての 2 倍体品種である「インカのめざめ」を育成することができた。独特の良食味を持ち、消費の現場において「男爵薯」を超える画期的な品種であると考えられ、栽培面積は 2006 年に 110 ha に達し増加傾向にある。

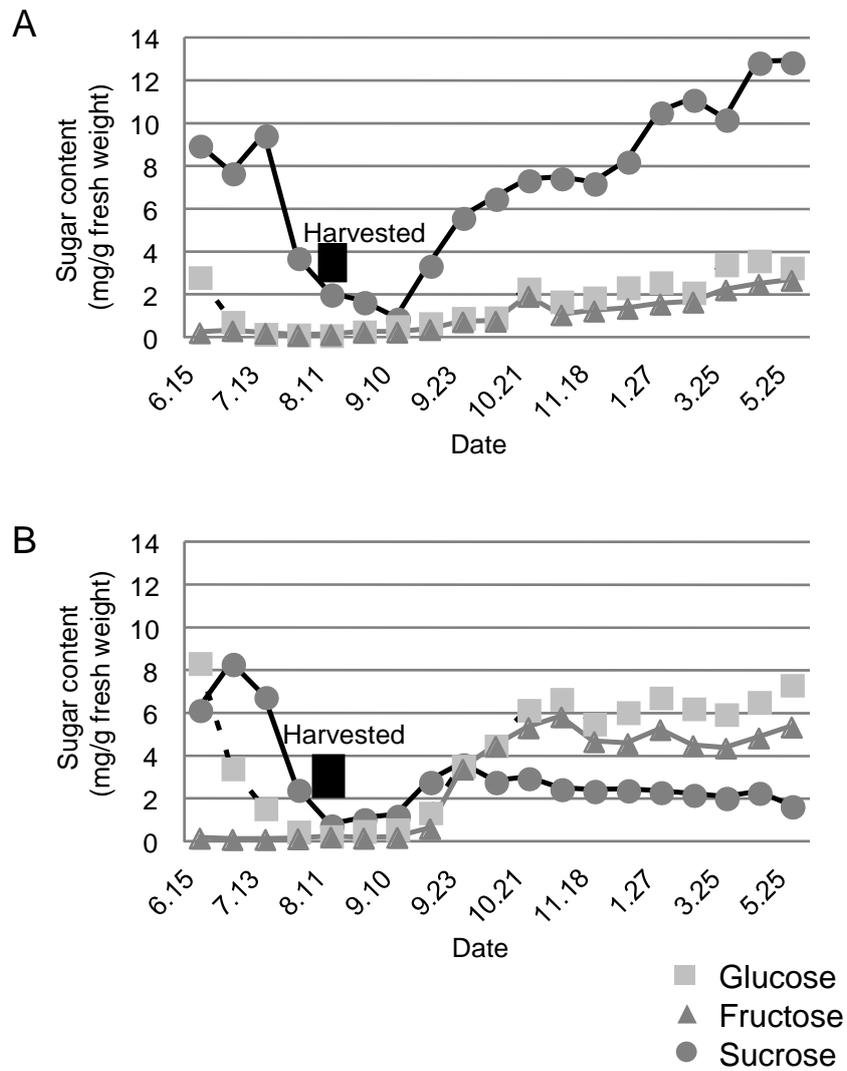


Figure 7. Changes in sugar contents in tubers of “Inca-nomezame” (A) and “Irish Cobbler” (B).

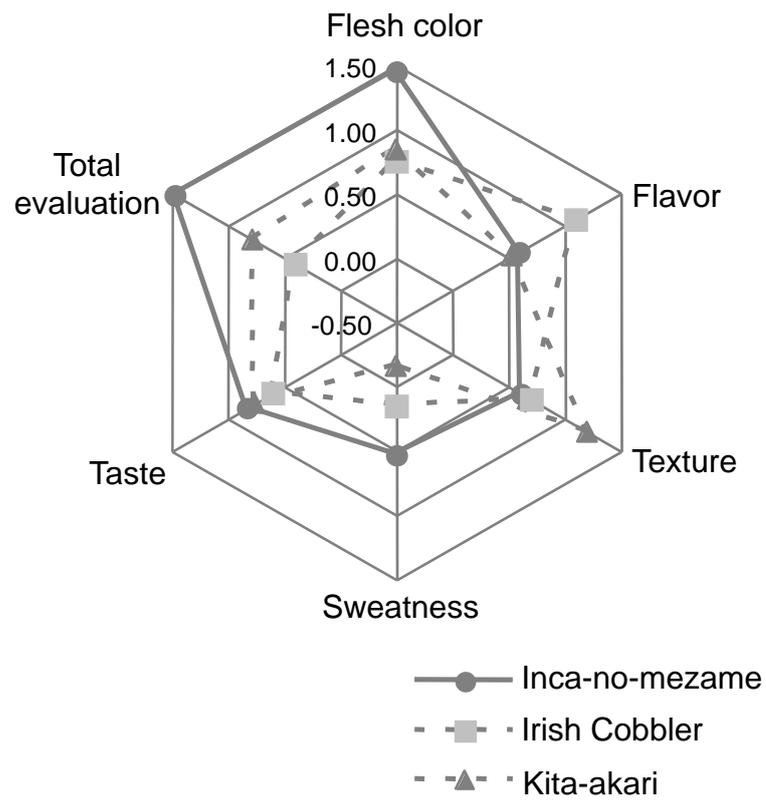


Figure 8. Sensory panel tests.

2倍体栽培種 *S. stenotomum* および *S. phureja* には、カロテノイド系色素を含有する濃黄肉系統が存在することが知られている。Brown et al. (1993)によると、塊茎肉色は、橙色 Or 遺伝子、黄色 Y 遺伝子（優性で黄色）と黄色 y 遺伝子（劣性で白色）からなる複対立遺伝子座により支配され、Or は Y に対し上位に発現して橙色となるとする考え方と、極めて近傍にかつ相反関係で連鎖する独立した橙色 Or 遺伝子座と黄色 Y 遺伝子座が存在するとする考え方が提示されている。いずれにせよ、「インカのめざめ」の肉色は、橙色 Or 遺伝子の発現によると推察される。

カロテノイド系色素は色と風味に関係するばかりでなく、人体に対する様々な機能性があり、活性酸素消去能に優れ、眼科疾病の白内障や加齢性黄斑変性症の予防効果が期待される（末木 2005）。また、本研究で明らかにしたように、普通品種に比べ「インカのめざめ」がタンパク質や脂質を多く含有することが、特有の質感や風味に関係すると推測される。

第5章

肉質部にアントシアニン色素を有する遺伝資源を用いた 有色バレイショ品種「インカパープル」および 「インカレッド」の育成

【緒論】

一般に栽培されるバレイショは、4倍体栽培種の *S. tuberosum* ssp. *tuberosum* に属し、塊茎の肉部は白～淡黄色である。ところが、バレイショの原産地である南米アンデス地域には、アントシアニン色素を含有して肉部が赤～紫色を呈する近縁栽培種が存在し、普通バレイショと直接もしくは倍数性操作により交雑可能である (De Jong 1991)。日本におけるバレイショの品種改良は、様々な近縁栽培種や野生種を利用し、高でん粉含量や耐病性などの有用形質を戻し交雑により取り込んできた (田口 1961、高瀬 1968)。この過程で、塊茎の肉部に着色のある雑種系統も出現したが、むしろ望ましくない形質として淘汰してきた歴史がある。

1990年代以降、従来はモノトーンであった食品が、多様な彩色によりカラフルになる傾向がある。一方で、消費者の健康と安全志向から合成着色料は忌避され、天然色素の機能性が見いだされるなど、赤や黄の色素を含有する野菜が新食材として注目されるようになった。サツマイモにおいては、アントシアニン色素を含有する紫肉系品種が沖縄県で「紅いも」と呼ばれ、特産物として青果用や加工用として普及が進められた。鹿児島県では在来品種の「山川紫」が色素原料として注目され、さらに色素含量と収量性を改良した「アヤマラサキ」がパウダーや色素原料として利用され、またジュースや発酵原料など多様な用途開発が進められている (山川 1999)。同じイモ類であるバレイショにおいても、天然由来の色素を含有する品種を育成することにより、新しい食材を提供し新規需要の開拓が期待されている。

Harbone (1960)が報告しているようにバレイショの皮部や肉部の着色はアントシアニン色素によるものである。肉部に着色のある系統を積極的に選抜

することにより、アントシアニン色素の集積を行い、有用成分の含量を高めた有色バレイシヨの育成が考えられ、家庭での調理向けばかりでなく、天然色素で着色した色彩豊かなポテトチップやスナック菓子向け新規食品素材の開発も期待される。そこで本研究では、新規の需要を創出して国産バレイシヨの振興を図ることを目的とし、栽培・生産側だけではなく積極的な販売・消費側を意識し有色バレイシヨの育成を試みた。

【材料と方法】

親系統

父本系統は、明治時代から栽培記録がある紫皮白肉の北海道在来品種「根室紫」の自然結果種子に由来し、塊茎維管束内の一部が紫の「島系 284号」を用いた (Figure 9)。なお「根室紫」は、第 2 章で明らかにしたように *S. tuberosum* ssp. *andigena* に由来すると考えられる系統である。母本系統は、北海道立根釧農業試験場で育成保存された遺伝資源であり、普通栽培種の祖先型亜種 *S. tuberosum* ssp. *andigena* (553-4) と「ワセシロ」の亜種間雑種系統「KW85091-21」、および「男爵薯」との亜種間雑種系統「KW85093-33」を用いた。前者は塊茎維管束内の一部が紫色を呈し、後者は赤色を呈する。

育種方法と特性調査

北海道農業試験場ばれいしょ育種研究室 (恵庭市島松) (現:北海道農業研究センター) において常法の育種法 (第 1 章参照) に従って行った。1997 年 4 月にばれいしょ育種研究室の所在地を畑作研究センター (現:芽室研究拠点、河西郡芽室町) へ移転した後も農作物新品種命名登録を目指して試験を継続した。

栽培特性および塊茎の品質特性調査については前章で記した通りである。

アントシアニン色素の抽出

バレイシヨ塊茎に対して塊茎重量の 4 倍量の 1%トリフルオロ酢酸 (TFA)を用いてアントシアニン色素を抽出した。バレイシヨ塊茎は、スライサ

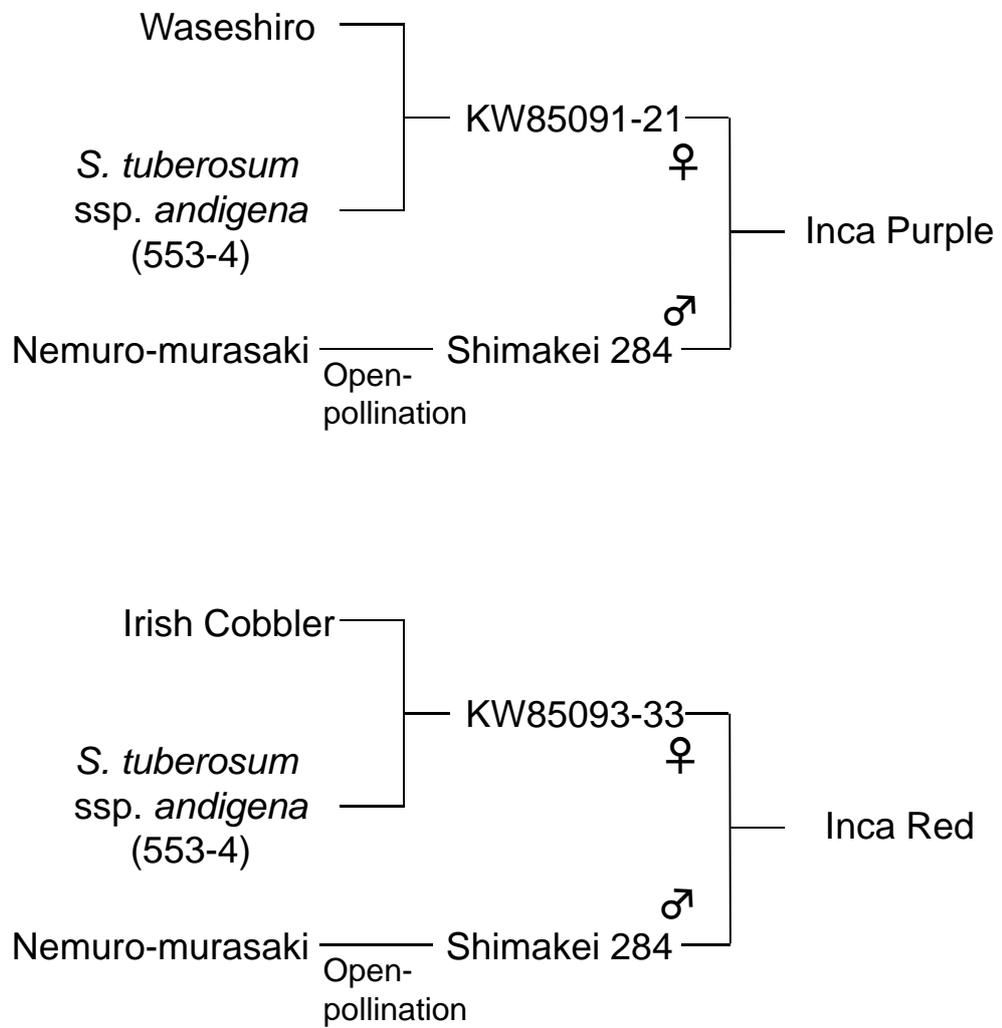


Figure 9. Pedigree of newly bred varieties “Inca Purple” and “Inca Red”.

ーを用いて 2mm 厚にスライスし、スライスが直接、抽出液に投入されるようにして、塊茎スライスの変色を防ぐようにした。42 時間、4 °C で静置してアントシアニン色素の塊茎からの抽出を行わせた。これを 0.22 μm フィルター (Millex-GV、MILLIPORE) で濾過したものを抽出液として用いた。

アントシアニン色素の吸光度測定ならびに HPLC 法

アントシアニン色素の吸光度測定ならびに HPLC 法は、既報 (Hayashi et al. 1996、林ら 1997b) によった。すなわち、HPLC 分析法は、Millennium™ 2010J HPLC system (Waters 製) に TSK gel ODS-80™ (4.6 mm I.D. × 250 mm、東ソー) を装着し、カラム温度を 40°C、流速は 0.8 ml/min、移動相をアセトニトリル-0.1%TFA (1:4、V/V) で構成した。アントシアニン色素のピークは Waters™ 996 フォトダイオードアレー検出器 (Waters 社製、USA) を用いて 220 nm~700 nm の 3 次元検出および 525 nm の波長における吸光度で検出した。アントシアニン色素の含有量はピーク面積を標準色素 (紫系は精製インカパープル色素、赤系は精製インカレッド色素) と比較して算出した。

アントシアニン色素の耐熱性と耐光性試験方法

各種色素 0.2 g を 1 ml の McIlvaine 緩衝液 (pH 3.2) に溶解し色素溶液を調製した。耐熱性試験には、各種色素溶液を 80 °C で 18 時間加熱し、加熱前の可視部の極大波長の吸光度を 100 とし、加熱後の相対的吸光度を算出し色素残存率を求めた。また、耐光性試験には、各種色素溶液に 6 W の紫外線灯 2 本を用いて、254 nm の紫外線 (照射量: 880 μW/cm²・分) を室温で 18 時間照射し、紫外線照射前の吸光度を 100 とし、紫外線照射後の相対的吸光度を算出し色素残存率を求めた。

【結果】

育成の経過

1990 年 7 月に「KW85091-21」を母として 262 花に「島系 284 号」の花粉を授粉し、128 粒の種子を得た。1991 年に播種して育成した 128 個体から紫肉

の3個体を選抜した（実生個体選抜）。ポット栽培で得られた全塊茎を列植えとして個体二次選抜を省略し、1992年の系統選抜により2個体に、1993年の生産力検定予備試験により1個体に絞られた。一方、「KW85093-33」を母として1990年7月に89花に「島系284号」の花粉を授粉し、2,293粒の種子を得た。1991年に播種して育成した1,792個体から赤肉の56個体を選抜した（実生個体選抜）。以下、1992年の系統選抜により6個体に、1993年の生産力検定予備試験により3個体に絞られ、1994年の生産力検定試験により2個体に、1995年の生産力検定試験により1個体に絞られた。

いずれも普及品種に比べ栽培特性は劣るが、その塊茎肉色が特異であることから新規需要開拓の可能性に着目する現地生産団体があり、実際に消費者や加工業者から受け入れられるかの試験販売等の取り組みが必要となった。このため、育成系統の権利が種苗法の未譲渡性に抵触して失効するのを未然に防ぐために、1997年に種苗法に基づき紫肉の「インカパープル」および赤肉の「インカレッド」として品種登録の申請を行った。2002年に優良な特性として肉色の新規性が認められ、農林水産省として新品種として普及させるに足ると判断され、日本で初めての有色バレイショ品種「ばれいしょ農林45号」および「ばれいしょ農林46号」として命名登録された。

「インカパープル」の特性

「インカパープル」の主要特性をTable 9に示した。「男爵薯」に比べ、萌芽期および開花期は同等もしくはやや遅く、熟期は茎葉黄変期が3週間程度遅い中晩生であった。花の色は「男爵薯」より青味が強い紫系で、花数は中程度であった。そう性は直立型で茎長は88 cmと長く、「男爵薯」より大きな地上部であった。地下部はストロンが長く、塊茎が広い範囲に分布していた。塊茎は楕円形をしており、皮色と肉色とも紫であった（Figure 10）。

国際検疫上の重要センチュウであるジャガイモシストセンチュウ抵抗性は有しないが、もう一つの重要病害であるジャガイモ疫病に対し圃場抵抗性を有し、「男爵薯」や中晩生の「農林1号」に比べ初発が遅く罹病の進行が遅かった（Figure 11）。そうか病（*Streptomyces scabies*, *S. turgidiscabies*）に対しては中程度の抵抗性を有していた。

収量は10 a当たりで3,832 kgと、「男爵薯」の4,103 kgに比べ劣り、

Table 9 Characteristic performance of “Inca Purple” and “Inca Red” in comparison with “Irish Cobbler”.

Characteristics	Inca Purple	Inca Red	Irish Cobbler
(1) General appearance¹⁾			
Vine shape	erect	erect (frequent lodging)	semi-erect
Flower color	purple	white	reddish-purple
No. of flowers	medium	rare	abundant
Stolon length	long	long	short
(2) Agronomic performance²⁾			
Emergence date	May 26	May 30	May 25
Flowering date	July 2	July 16	June 27
Senescence date	September 16	September 16	August 27
No. of marketable tubers per hill	9.9	9.7	11.2
Mean tuber weight	88 g	78 g	84 g
Total yield per 10 a	3,832 kg	3,720 kg	4,103 kg
Marketable yield per 10 a	3,291 kg	3,082 kg	3,411 kg
Starch content	20.4 %	11.6 %	15.8 %
Stem length	88 cm	83 cm	39 cm
No. of stems per hill	3.0	2.9	4.6
(3) Tuber character¹⁾			
Tuber shape	oval	oval	round
Skin color	purple	light red	creamy white
Flesh color	purple	red	white
Tuber dormancy period	very long	long	slightly long

(4) Cooking quality ¹⁾			
Darkening after peeling	medium	slight	slight
Sloughing after boiling	moderate	none	moderate
Mealiness after boiling	slightly sticky	slightly sticky	slightly mealy
Taste after boiling	excellent	slightly excellent	excellent
Chip quality	acceptable	acceptable	not acceptable
Fry quality	acceptable	not acceptable	not acceptable
(5) Disease and pest response ¹⁾			
Cyst nematode	susceptible (h ₁)	susceptible (h ₁)	susceptible (h ₁)
Late blight	resistant	resistant	susceptible
Common scab	moderate	resistant	susceptible
Bacterial wilt	slightly susceptible	resistant	susceptible
Potato virus Y	susceptible	susceptible	susceptible

¹⁾Mean in 2000-2002, and ²⁾mean in 2000-2004.

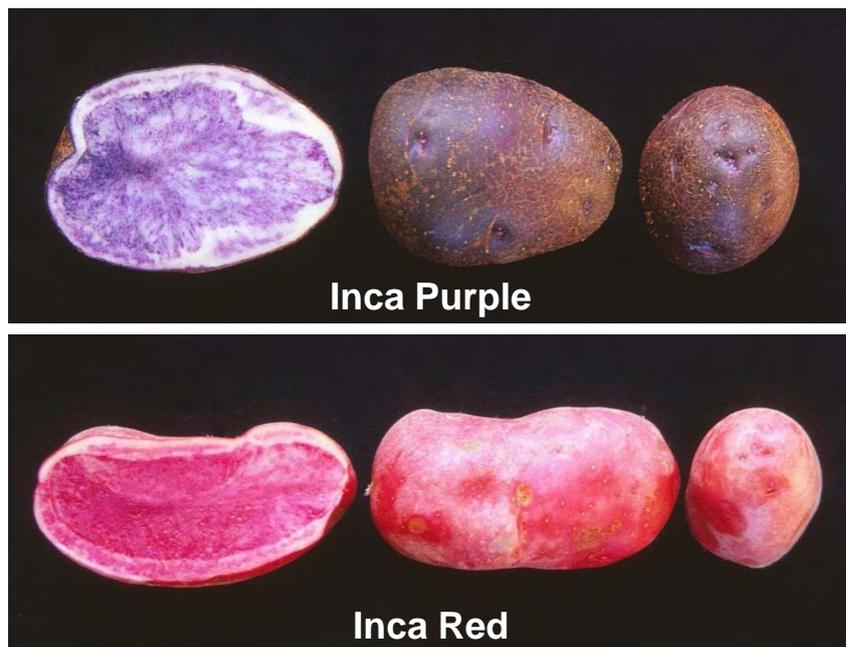


Figure 10. Tuber morphology of newly bred varieties “Inca Purple” and “Inca Red”.

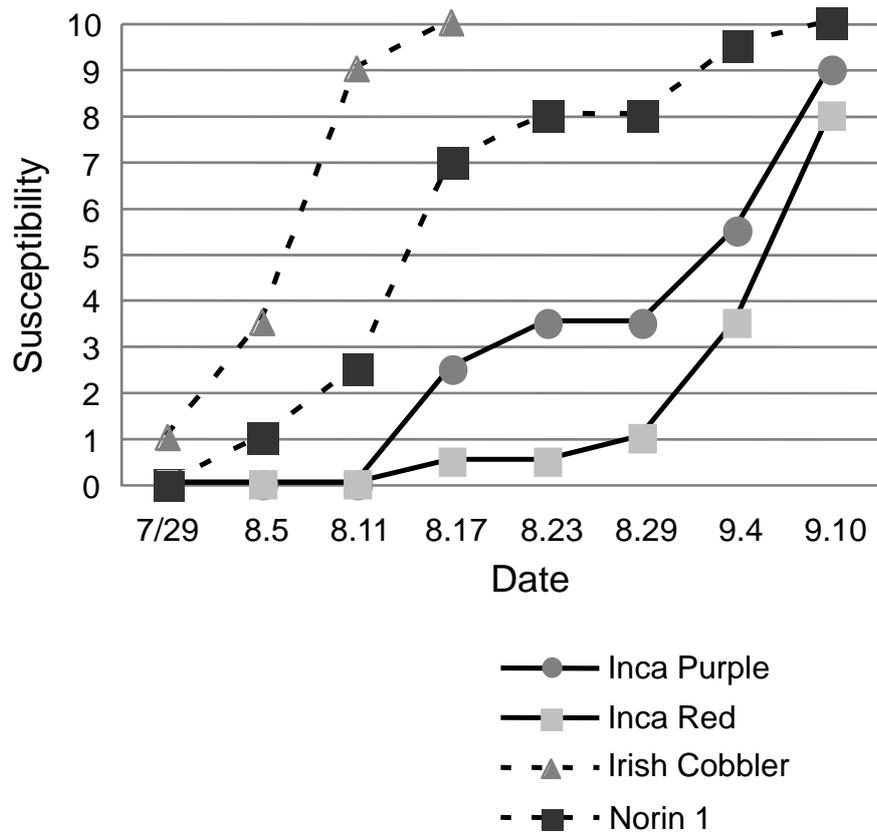


Figure 11. Susceptibility of “Inca Purple” and “Inca Red” to late blight, in comparison to that of “Irish Cobbler” and “Norin 1”.

熟期が中晩生であることを勘案すればかなり低かった。塊茎の平均1個重は88gと十分であるが、株当たりイモ数が9.9個と少なかった。また、「男爵薯」は7月下旬から8月上旬にかけて十分な収量に達するが、9月上旬にならないと十分な収量が得られなかった。でん粉含量は20.4%で、「男爵薯」の15.8%に比べかなり高く、でん粉原料用品種並の高さであった。

「インカレッド」の特性

「インカレッド」の主要特性をTable 9に示した。「男爵薯」に比べ、初期生育が劣り萌芽期および開花期ともに遅く、熟期は茎葉黄変期が3週間程度遅い中晩生であった。花の色は「男爵薯」が赤紫系に対し白、花数はごく少なかった。そう性は直立型であるが倒伏が多かった。茎長は平均83cmと長く、「男爵薯」（茎長39cm）より大きな地上部であった。このため薬剤散布など栽培管理はしづらい。地下部はストロンが長く、塊茎が広い範囲に分布していた。塊茎は楕円形をしており、皮色は淡赤で肉色は赤であった（Figure 10）。

国際検疫上の重要センチュウであるジャガイモシストセンチュウ抵抗性は有しないが、もう一つの重要病害であるジャガイモ疫病に対し圃場抵抗性を有し、「男爵薯」や中晩生の「農林1号」に比べ初発が遅く罹病の進行が遅かった（Figure 11）。そうか病に対し強度の抵抗性を有していた。

10a 当たり収量は3,720kgで、「男爵薯」より劣り、熟期が中晩生であることを勘案すればかなり低かった。塊茎の平均1個重は78gとなり十分であるが、株当たりイモ数が9.7個と少なかった。また、「男爵薯」は7月下旬から8月上旬にかけて十分な収量に達するが、「インカレッド」は9月上旬にならないと十分な収量とならなかった。でん粉含量は「男爵薯」より低く11.6%で、一般品種の中で最も低かった。

「インカパープル」および「インカレッド」の調理特性

「インカパープル」は水煮すると煮くずれるが、蒸すと粘りの多い肉質となった。独特の食味があり、油で揚げるチップやフライの適性も中程度であった。「インカレッド」はでん粉含量が少ないので水煮しても煮くずれないが、味が淡泊すぎることもあり、フキを茹でた時のような風味が特徴であっ

た。油で揚げるチップの適性は中程度あるが、フライには適さなかった。「インカパープル」および「インカレッド」とも水煮や蒸しにより加熱するとアントシアニン系の赤～紫色は色調がくすみ退色することが観察され、特に紫系で顕著であった。放冷すると色調が戻るため、冷めた状態で利用する料理では利用可能であるが、暖かい状態で食する料理には難が多いと考えられた。ところが油を用いたフライ調理では赤色や紫色が鮮明に残り、品温に関わらず色鮮やかな調理品を得ることができ、疎水状態で発色がより安定すると考えられる。さらに色調は酸度や金属イオンの影響を受けやすく、生いもの色調がそのまま調理品に現れない難しさがあった（森 2003）。

アントシアニン色素の特徴

「インカパープル」および「インカレッド」の色素について、色素構造および色素安定性について検討した。両品種の色素は吸光度測定の結果、Harborne (1960)の報告のようにアントシアニン色素と確認された。また、HPLC 分析の結果、両品種ともアントシアニン色素は約 6 種類程度の色素で構成されていた。石井ら (1996b) は、質量分析および NMR 分光法の結果から、「インカパープル」の主色素はペタニン (Petanin、3-O-[6-O-(4-O-*p*-coumaroyl- α -L-rhamnopyranosyl)- β -D-glucopyranosyl]-5-O- β -D-glucopyranosyl-petunidin) であり、「インカレッド」の主色素はペラニン (Pelanin、3-O-[6-O-(4-O-*p*-coumaroyl- α -L-rhamnopyranosyl)- β -D-glucopyranosyl]-5-O- β -D-glucopyranosyl-pelargonidin) であることを明らかにした。「インカパープル」の紫色素は生イモ 100 g 当たり平均 174 mg、「インカレッド」の赤色素は生イモ 100 g 当たり平均 179 mg 含有し、両品種とも色素の含有量は年次変動が大きく 2 倍程度の開きがあった (Table 10)。

アントシアニン色素の耐光性および耐熱性の調査をしたところ (Table 11)、「インカレッド」のペラニンを主成分とする赤系色素の残存率はそれぞれ 66%と 53%で、「インカパープル」のペタニンを主成分とする紫系色素に比べ (それぞれ 47%と 27%) 安定性が高かった。赤色素の安定性は紫サツマイモや赤キャベツの色素よりやや低かったが、果実類や黒豆などの色素よりは高かった (Table 11)。これは、Hayashi et al. (1996)の報告にあるように、アントシアニン色素の耐熱性と耐光性は色素の HPLC 分析のピーク数と相関が高く、バレイショが 3~6 のピーク数であるのに対し、安定性に優れる紫サツマ

Table 10 Yearly changes of anthocyanin content (mg/100 g fresh weight) in “Inca Purple” and “Inca Red”.

Variety	1998	1999	2000	2001	2002	Mean	SD
Inca Purple	305	138	120	177	131	174	76
Inca Red	180	124	149	175	265	179	53

SD=Standard deviation

Table 11 Effects of heating and UV irradiation on the stability of anthocyanins of “Inca Purple”, “Inca Red”, and other sources.

Source of anthocyanin	Color at pH 3.0	Residual ratio (%)	
		Heating	Irradiation
Inca Purple	Purple	47	27
Inca Red	Reddish purple	66	53
Purple sweet potato	Reddish purple	71	74
Red cabbage	Reddish purple	60	43
Red radish	Orange	54	69
Eggplant	Purple	22	18
Black soybean	Reddish purple	19	26
Strawberry	Red	24	6
Grape	Reddish purple	17	22

イモや赤キャベツは8~12のピーク数であった。熱や光によるアントシアニン色素の安定性に差が認められるのは、内在するアントシアニン色素の種類が原因の1つと考えられ、この現象は、アントシアニン色素の自己会合型スタッキングによるものと思われる（林ら 1997a）。

【考察】

わが国のバレイショ育種の重要な課題の一つは、「男爵薯」の壁を打破し普及しうる優良な食用の新品種を育成することである。これまでも、栽培特性や品質特性では「男爵薯」を凌駕する品種が育成されてきたが、「男爵薯」のネームバリューは大きく、それを打破して広く消費者に浸透する品種は生まれてこなかった。この反省を踏まえて企画されたのが、「インカパープル」と「インカレッド」の育成である。すなわち、「バレイショと言えば男爵薯」という消費者のイメージを変え、「男爵薯」以外にもバレイショ品種があるという認識を得るため、色彩という一目で判る特性を劇的に変えることを目的とし、本研究では紫皮で紫肉の「インカパープル」と、赤皮で赤肉の「インカレッド」を育成することができた。

「インカパープル」は、アントシアニン色素を生イモ 100 g 当たり平均 174 mg を含有し、「インカレッド」は 179 mg を含有していた。これらのアントシアニン色素は水煮や蒸すと色調がくすみ退色するが放冷すると色調が戻り、冷めた状態で利用する料理では利用可能であった。また、油を用いたフライ調理では赤色や紫色が鮮明に残り、品温に関わらず色鮮やかな調理品を作ることから、Figure 12 に例示したように、様々な用途への利用が考えられる。

脂質の過酸化反応は老化や様々な疾病を引き起こすと考えられており、一般にアントシアニン色素はこの過酸化反応を抑える抗酸化などの機能性を有する。バレイショ・アントシアニン色素の抗酸化力は、 α -トコフェノールより強く、合成酸化防止剤に匹敵する能力があると報告されている（石井ら 1996a）。また、バレイショ・アントシアニン色素の新たな機能性として、非常に高い抗インフルエンザウイルス活性や抗ガン性が見いだされた。アントシアニン色素の抗インフルエンザ活性はエルダベリー (*Sambucus nigra*) および

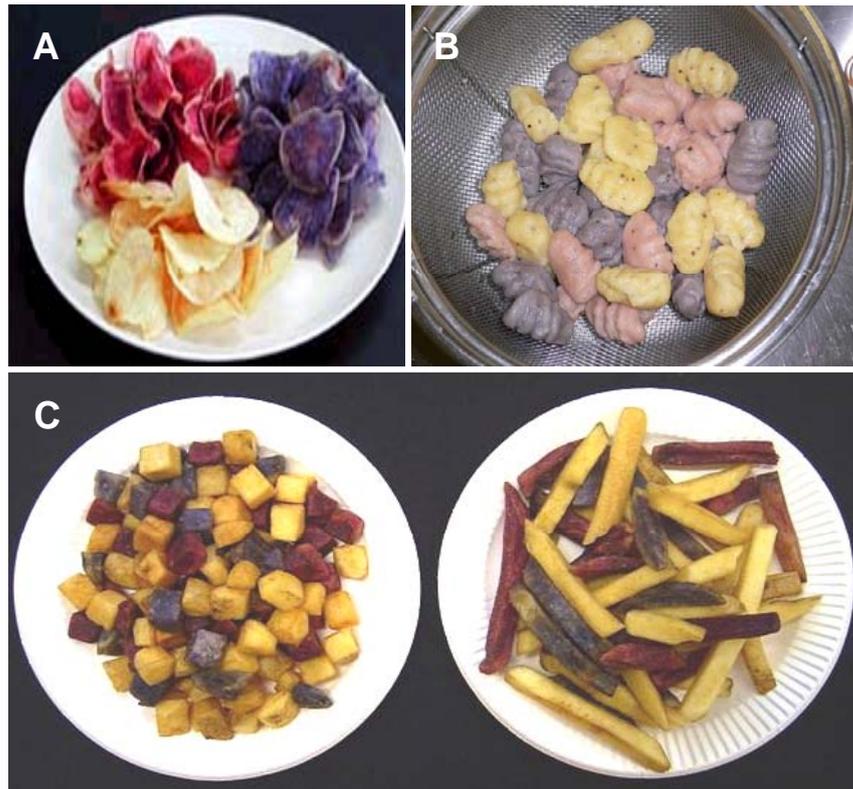


Figure 12. Colorful potatoes, using “Inca Purple” and “Inca Red”, processed to chips (A), gnocchi (B), and dice- or stick-type french fries (C).

中国黒竜江省の黒加倫 (*Ribes nigrum*) に認められるが、他の植物由来のアントシアニン色素ではほとんど知られていないものであり、これらの植物よりも非常に高い抗インフルエンザウイルス活性をバレイショ・アントシアニン色素が有することが明らかにされた (Hayashi et al. 2003)。さらにお茶の渋み成分であるカテキンは、胃ガン細胞をアポトーシス (自発的な細胞死) に導き死滅させる効果があることは世界中に認められているが、バレイショ・アントシアニン色素にも、ヒト胃ガン細胞の増殖を抑制する高いアポトーシス誘導効果が認められている (Hayashi et al. 2006)。

したがって、紫皮で紫肉の「インカパープル」と、赤皮で赤肉の「インカレッド」は、「男爵薯」のような普及品種に比べ栽培特性は劣るが、色彩という面で新規な食材であるばかりでなく、抗酸化力や抗インフルエンザウイルス活性などの高い機能性を有しており、需要の拡大に貢献できるものと考えられる。

第 6 章

第 2 世代有色バレイショ品種群の育成

【緒論】

消費者のバレイショに対する既存イメージを覆し、市場の活性化と新規需要の開拓を狙うものとして、前章では、紫皮紫肉の「インカパープル」と、赤皮赤肉の「インカレッド」の育成について述べた。その後、アントシアニン色素の機能性が注目され、バレイショのアントシアニン色素についても高い機能が期待されている（Hayashi et al. 2003、2006）。

紫肉のカラフルポテトとして育成された「インカパープル」は、アントシアニン含有量が高いものの、塊茎の肥大が遅く収量の安定性が低い、あるいはジャガイモシストセンチュウ抵抗性がないなどの欠点があり、より栽培しやすい紫肉の品種が求められていた。また、実需現場からはさらに色素含量の高い紫肉の品種も求められていた。同様に、赤肉のカラフルポテトとして育成した「インカレッド」も、熟期が遅く塊茎の肥大も遅い、そしてジャガイモシストセンチュウ抵抗性がないなどの欠点があり、より栽培しやすい赤肉の品種が求められていた。そこで本研究では、より栽培特性や色素含量を向上させた第二世代の有色バレイショの育成を試みた。また、有色サツマイモのアントシアニン色素は天然色素の抽出原料として利用されているので（山川 1999、熊谷 2000）、有色バレイショについても天然色素抽出原料としての評価を併せて行った。

【材料と方法】

親系統

明治時代から栽培記録がある紫皮白肉の在来品種「根室紫」の自然結果種子に由来する「島系 284 号」（塊茎維管束内の一部が紫）に、ジャガイモシストセンチュウ

抵抗性を有し実用性の優れる白肉系統「83015-47」を交配して得られた、紫肉とジャガイモシストセンチュウ抵抗性を併せ持ち晩生で多収の系統である「島系 571 号」を母本系統として用いた。父本系統としては、中早生でジャガイモシストセンチュウ抵抗性と油加工適性を有するが小粒で低収の「島系 561 号」を用いた (Figure 13)。

育種方法と特性調査

北海道農業試験場ばれいしょ育種研究室 (恵庭市島松) (現:北海道農業研究センター) において常法の育種法 (第 1 章参照) に従って行った。1997 年 4 月にばれいしょ育種研究室の所在地を畑作研究センター (現:芽室研究拠点、河西郡芽室町) へ移転した後も農作物新品種命名登録を目指して試験を継続した。

栽培特性および塊茎の品質特性調査については第 4 章で記した通りである。また、アントシアニン色素の分析法は第 5 章に記した通りである。

生育経過追跡調査

第 4 章で記した栽培特性調査と同一条件で栽培を行った。7 月 1 日から 2 週間毎に 1 区 10 株 2 反復で、茎長、地上部重、上イモ数、上イモ重およびでん粉価の調査を行った。

塊茎内アントシアニン色素の分布調査

塊茎を Vertical Slicar HS-1 (日本分光) を用いて 0.1 mm の厚さで切片を切り、光学顕微鏡の透過光により 40 倍で色素細胞の分布を観察した。

色価による色素評価法

2008 年度の北海道農業研究センター産塊茎を用いて色価を求めた。色価は、色素原料 1 g が示す色の濃さを示すもので、色価=吸光度(A)/色素量(g)で表される。色素溶液の最大吸収波長で入射光を I_0 とし、色素溶液を透過して出てきた透過光を I とし、吸光度 (A) は、 $A=\log(I_0/I)$ と定義される。色素 1 g を 10 ml に溶かした液の吸光度が 1 のとき色価 1 となる。色素の抽出は、予め硫酸酸性の抽出溶媒を調製しておき、そこへ試料をスライスして直接投入した。1 番抽出は、「ノーザンルビー」と「キタムラサキ」は試料に対して 3 倍、「シャドークイーン」は 5 倍で 0.5% 硫酸を加えた。2 番抽出は「ノーザンルビー」と「キタムラサキ」は試料に対して 1.5 倍、「シャドーク

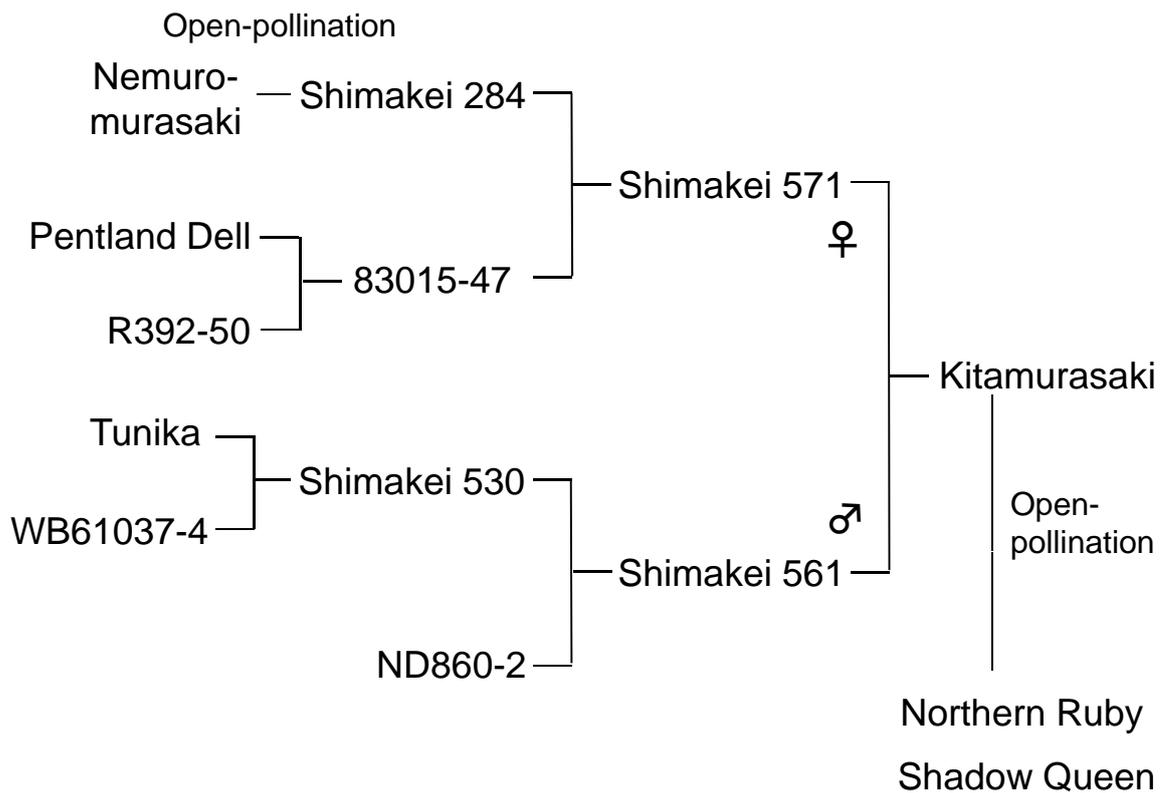


Figure 13. Pedigree of second generation colored potato varieties “Kitamurasaki”, “Northern Ruby” and “Shadow Queen”.

ーン」は2.5倍で、0.25%硫酸を加水した。3番抽出は水のみで加水した。それぞれ24時間の室温静置にて抽出し、それぞれの吸光度を測定して色価を求めた。比較対照として、2006年の九州沖縄農業研究センター産色素原料用サツマイモ「アヤマラサキ」を用いた。

【結果】

育成の経過

1991年7月に「島系571号」を母として83花に「島系561号」の花粉を授粉し、1,260粒の種子を得た。1992年にポットで1,260個体を育成し紫肉色の濃い77個体を選抜した（実生個体選抜）。1993年に肉色が濃く複数の種イモを確保できた10系統について個体二次選抜試験を省略し、圃場で1列植えの系統選抜試験を行い、収量や塊茎の大きさなどの実用形質を考慮しながら紫肉色の濃さで選抜し3系統を残した。残りの67個体は1株植え（個体二次選抜）に供試し5個体を選抜したが、1994年の系統選抜試験で総て棄却した。1993年に系統選抜試験で選抜した3系統は、1994年の生産力検定予備試験で、ジャガイモシストセンチュウ抵抗性を持ちかつ収量性も優れる「91091-103」系統に「島系578号」を付した。1995年より生産力検定試験および系統・地域適応性検定試験に供試し、特性が優れていると評価されたが、1998年にウイルスの罹病により試験を中断、ウイルスフリー化後に十分な供試用種いもを増殖し、2000年に「北海88号」の地方番号を付して実用性の評価を再開した。2003年に種苗法に基づく品種登録の申請を行い、2004年に「ばれいしょ農林50号」として農林水産省の農作物新品種命名登録され「キタムラサキ」と名付けられた。

1993年9月に「91091-103」（後の「キタムラサキ」）の放任受粉による931粒の自然結実種子を採種した。なお、多様な遺伝子型の品種および系統が栽植されている育種圃場での放任受粉であるため、花粉親を特定することは不可能であった。1997年にポットで896個体を育成し実生個体選抜試験によって、赤肉色もしくは紫肉色の濃い189個体を選抜した。個体二次選抜を省略し、1998年に全189個体について圃場で1列植えの系統選抜試験を行い、収量や塊茎の大きさなどの実用形質を考慮しながら肉色の濃さで選抜し18系統を選抜した。その後、1999年の生産力検定予備試験で9系統に、2000年の生産力検

定試験で7系統に、2001年の生産力検定試験で5系統に、2002年の生産力検定試験で4系統に、2003年の生産力検定試験で赤肉の「勝系4号」と紫肉の「勝系3号」の2系統に絞られた。「勝系4号」は2002年の生産力検定試験および系統適応性検定試験により、赤肉で栽培しやすくジャガイモシストセンチュウ抵抗性であることが評価され「北海91号」の地方番号を付された。紫肉の「勝系3号」は、ジャガイモシストセンチュウ抵抗性は有しないが濃紫肉の特徴が際だっていると評価され、2003年に「北海92号」の地方番号を付された。両系統とも2005年に種苗法に基づく品種登録の申請を行い、同年に「ばれいしょ農林56号」および「ばれいしょ農林57号」として農林水産省の農作物新品種命名登録され「ノーザンルビー」および「シャドークイーン」と名付けられた。

生態・形態的特徴、収量性、調理特性および耐病虫性

第2世代有色バレイショ品種「キタムラサキ」、「ノーザンルビー」および「シャドークイーン」の主要特性をTable 12に、また、塊茎形態をFigure 14に示した。

(1) 紫皮紫肉品種「キタムラサキ」

「キタムラサキ」は「男爵薯」に比べ、萌芽期および開花期ともやや遅く、熟期は茎葉黄変期が3週間以上遅い中晩生であった。花の色は白で、花数は中程度であった。そう性（草型）はやや直立型で茎は太く茎長は長く、どの生育段階でも「男爵薯」より地上部が大きく、Figure 15に示すように、「インカパープル」と同様な生育経過をたどった。塊茎が着生するストロンは「男爵薯」より長いですが、培土からはみ出して緑化イモとなることは少なかった。塊茎の目は浅く倒卵形をしており、皮色と肉色とも紫であった（Figure 14）。塊茎の休眠期間は「男爵薯」より長かった。生育段階の早い時期に茎葉処理もしくは早期収穫を行うと、貯蔵した翌年春にストロン基部側から萎びることがあるが、種イモとしての出芽力には問題なかった。

収量は「男爵薯」に比べ、株当たり上イモ数はほぼ同じ（「キタムラサキ」は9.4個で「男爵薯」は9.9個）だが、塊茎の平均1個重が「男爵薯」の92gに比べ、「キタムラサキ」では122gと大きいため、上イモ重（＝収量）で20%以上多収となった。でん粉価は「男爵薯」より2%程度高い18.0%とな

Table 12 Characteristic performance of “Kitamurasaki”, “Northern Ruby” and “Shadow Queen” in comparison with “Irish Cobbler” (mean in 2001-2004).

Characteristics	Kitamurasaki	Northern Ruby	Shadow Queen	Irish Cobbler
(1) General appearance				
Vine shape	slightly erect	erect	semi-erect	semi-erect
Stem thickness	thick	slightly thick	slightly thick	medium
Leaflet size	small	slightly large	small	large
Flower color	white	white	white with radial purple	reddish-purple
No. of flowers	medium	medium	abundant	abundant
Stolon length	medium	medium	medium	short
(2) Agronomic performance				
Emergence date	May 27	May 26	May 25	May 23
Flowering date	July 1	July 1	June 30	June 26
Senescence date	September 16	September 1	September 11	August 24
Stem length	77 cm	56 cm	80 cm	37 cm
No. of stems per hill	2.7	2.9	3.3	3.7
Stolon length	medium	medium	medium	short
No. of marketable tubers per hill	9.4	7.7	9.6	9.9
Mean tuber weight	122 g	111 g	102 g	92 g
Total yield per 10 a	4,884 kg	3,757 kg	4,304 kg	3,992 kg
Marketable yield per 10 a	4,594 kg	3,492 kg	3,972 kg	3,483 kg
Starch content	18.0 %	15.8 %	18.6 %	16.3 %

(3) Tuber character				
Tuber shape	ovate	oval	oval	round
Eye depth	shallow	shallow	shallow	deep
Skin color	purple	red	purple	creamy white
Flesh color	purple	red	purple	white
Tuber dormancy period	long	slightly long	slightly long	slightly long
(4) Cooking quality				
Darkening after peeling	rare	slight	rare	slight
Sloughing after boiling	slight	slight	medium	medium
Mealiness after boiling	slightly sticky	slightly sticky	medium	slightly mealy
Taste after boiling	slightly bad	medium	excellent	excellent
Browning after frying	medium	slight	slight	medium
(5) Disease and pest response				
Cyst nematode	resistant (H ₁)	resistant (H ₁)	susceptible (h ₁)	susceptible (h ₁)
Late blight	medium	slightly susceptible	slightly susceptible	susceptible
Common scab	susceptible	slightly susceptible	slightly susceptible	susceptible
Powdery scab	slightly resistant	resistant	slightly resistant	susceptible
Potato virus Y	susceptible	susceptible	susceptible	susceptible

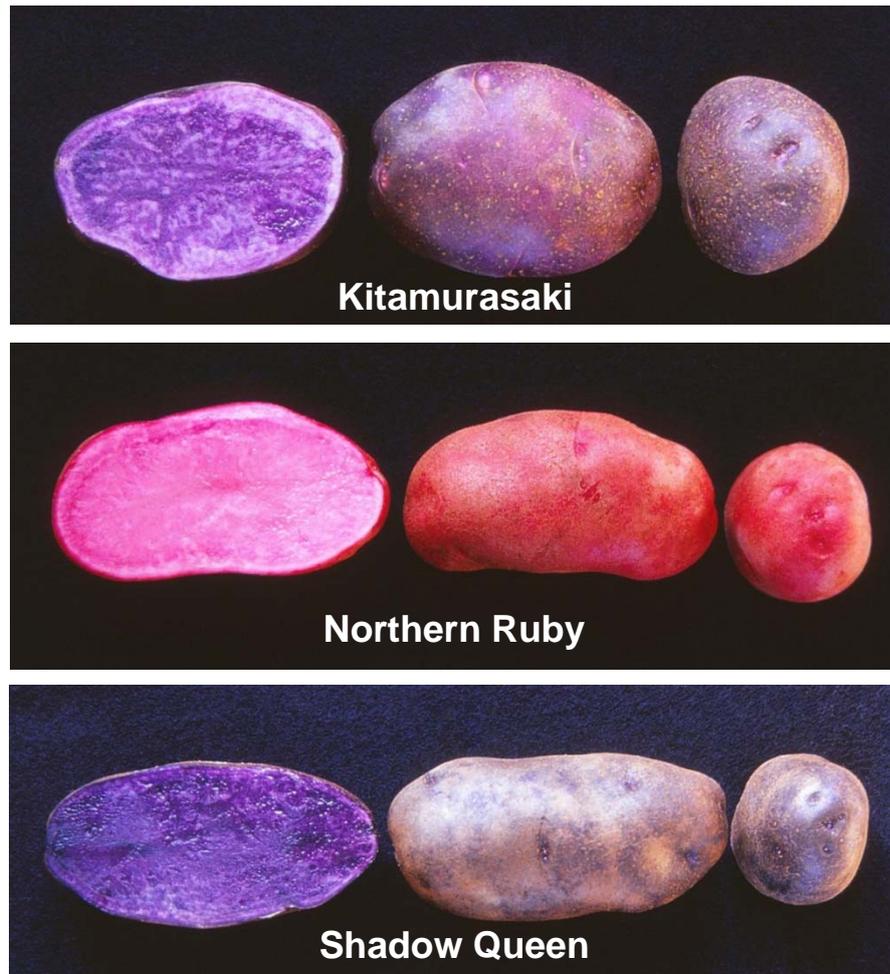


Figure 14. Tuber morphology of second generation colored potato varieties “Kitamurasaki”, “Northern Ruby” and “Shadow Queen”.

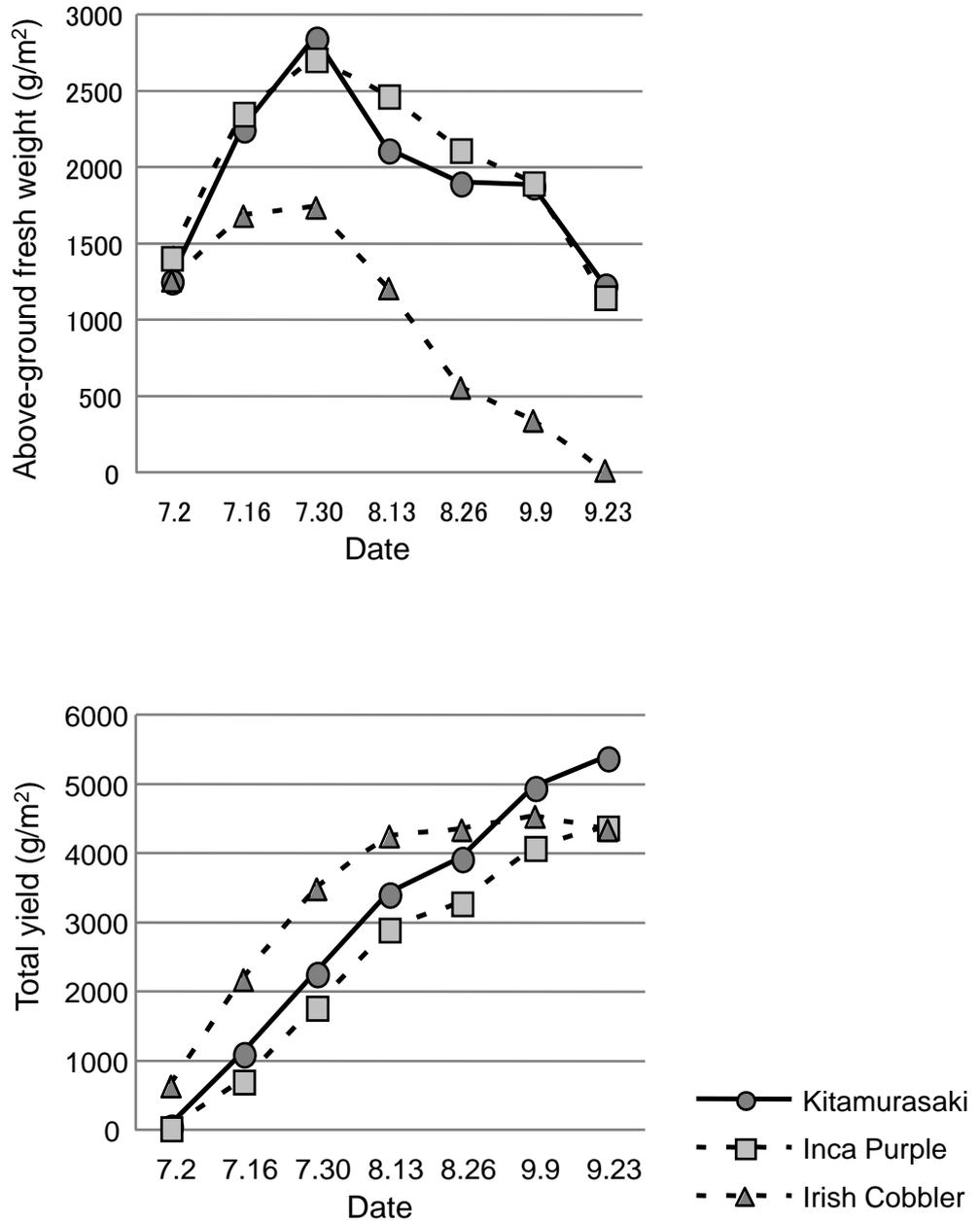


Figure 15. Above-ground growth and tuber yield in “Kitamurasaki”, “Inca Purple” and “Irish Cobbler”.

った。「男爵薯」の上イモ重は7月下旬から8月上旬にかけて塊茎の肥大が進み増加するが、「キタムラサキ」の平均1個重は8月中旬以降に増加し、9月に入ると上イモ重が上回った（Figure 15）。「インカパープル」との比較では、上イモ重はどの時期でも「キタムラサキ」が上回っていた（Figure 15）。

「キタムラサキ」は、水煮時の煮崩れが少なく、肉質はやや粘であり、食味は「男爵薯」より劣っていた。「インカパープル」と同様に、水煮や蒸しにより加熱するとアントシアニン系の紫色は色調がくすみ退色するが、放冷すると色調が戻った。また、油を用いたフライ調理では、紫色が鮮明に残るものの中程度の褐変が見られた。

「キタムラサキ」は「男爵薯」や「インカパープル」が保有しないジャガイモシストセンチュウ抵抗性を有し、ジャガイモ疫病の圃場抵抗性は中程度、粉状そうか病もやや強と、「男爵薯」に比べ耐病性が優れていた。

（2）赤皮赤肉品種「ノーザンルビー」

「ノーザンルビー」は、「男爵薯」に比べ萌芽期および開花期ともやや遅く、熟期は茎葉黄変期が1週間程度遅い中早生であった。花の色は白で、柱頭が赤紫に着色し、花数は中程度であった。そう性（草型）は直立型で茎はやや太く茎長は中程度であり、地上部生体重は「男爵薯」より大きく「インカレッド」より小さい生育経過をたどった（Figure 16）。「インカレッド」は晩生で地上部が開張型に大きく広がる草型であるのに比べ、「ノーザンルビー」は直立にまとまった草型となり栽培しやすかった。しかし、「ノーザンルビー」は8月以降の生育後半で下葉から枯れ上がる生理障害が見られることがあった。塊茎が着生するストロンは「男爵薯」より長いが、培土からはみ出して緑化イモとなることは少なかった。塊茎は長楕円形で目は浅く、皮色と肉色とも赤であった（Figure 14）。なお、生理障害によって塊茎内に壊死細胞が生じる褐色心腐は、「男爵薯」と同程度発生し褐色心腐部位の周囲にアントシアニン色素が濃く蓄積する現象が見られた。塊茎の休眠期間は「男爵薯」と同程度であった。

「男爵薯」の株当たりの上イモ数9.9個に比べ、「ノーザンルビー」は7.7個と少ないため、塊茎の平均1個重が111gと大きくても10a当たり収量は3,757kgと、「男爵薯」の3,992kgをやや下回った。でん粉価は「男爵薯」

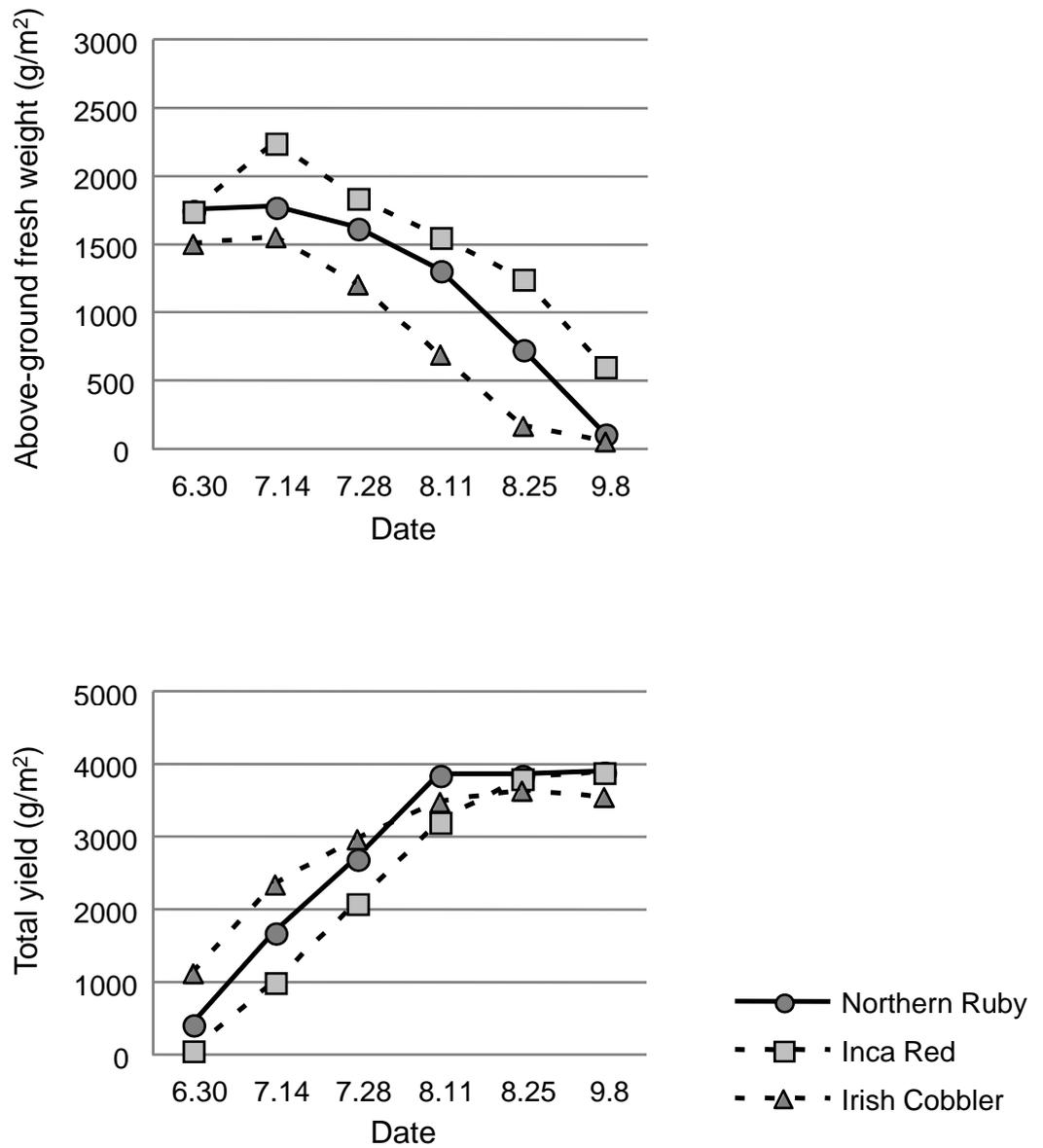


Figure 16. Above-ground growth and tuber yield in “Northern Ruby”, “Inca Red” and “Irish Cobbler”.

とほぼ同等の 15.8%で、「インカレッド」の 12%程度 (Table 9) に比べ高かった。「男爵薯」の上イモ重は 7 月上旬から高めに推移するが、「ノーザンルビー」は 8 月上旬でようやく「男爵薯」と同水準に達した (Figure 16)。これは「インカレッド」が 8 月下旬にようやく「男爵薯」並になるのに比べ、上イモ重の増加時期が明らかに早かった (Figure 16)。

「ノーザンルビー」は、水煮時の煮崩れが少なく、肉質はやや粘であり、食味は「男爵薯」よりやや劣っていた。「インカレッド」と同様に、水煮や蒸しにより加熱するとアントシアニン系の赤色はやや退色するが、放冷すると色調が戻った。また、油を用いたフライ調理では赤色が鮮明に残り、製品の褐変も少なかった。

「ノーザンルビー」は、「男爵薯」と「インカレッド」が保有しないジャガイモシストセンチュウ抵抗性を有し、粉状そうか病にも強かった。ジャガイモ疫病とジャガイモそうか病にはやや弱であるが、「男爵薯」に比べれば耐病性に優れていた。

(3) 紫皮紫肉品種「シャドークイーン」

「シャドークイーン」は、「男爵薯」に比べ萌芽期および開花期ともやや遅く、熟期は茎葉黄変期が 2 週間以上遅い中晩生であった。花の色は白で、花弁の脈に沿って星形に紫の着色が見られ、柱頭も紫色を示した。花数は「男爵薯」並に多かった。そう性 (草型) は中間型で、茎は濃い紫色をしており、やや太く茎長は長かった。塊茎の目は浅く長楕円形をしており、皮色と肉色とも紫であった (Figure 14)。塊茎の休眠期間は「男爵薯」と同程度であった。

収量は、「男爵薯」に比べると、株当たりの上イモ数は 9.6 個でほぼ同じだが、塊茎の平均 1 個重が 102 g とやや大きいため、上イモ重で 10 a 当たり 4,304 kg と 8%程度多収となった。でん粉価は「男爵薯」より 25%程度高い 18.6%であった。

「シャドークイーン」は、水煮時の煮崩れが「男爵薯」と同様に中程度で、水煮時の食味は「男爵薯」並に優れていた。「インカパープル」や「キタムラサキ」のアントシアニン系の紫色は水煮や蒸しにより加熱すると退色するが、「シャドークイーン」のそれは調理品が熱い状態でも紫の色調は残り、放冷すると元の色調が戻った。また、油を用いたフライ調理では、紫色がさらに

深まりやや濃すぎる色調となり、褐変は中程度であった。

「シャドークイーン」は、「男爵薯」と同様にジャガイモシストセンチュウ抵抗性を有しないが、粉状そうか病にやや強く、また「男爵薯」に比べればジャガイモ疫病とジャガイモそうか病に対する耐病性が優れていた。

アントシアニン色素の塊茎内での分布

塊茎切断面の様子と色素細胞の分布を Figure 17 に示した。塊茎切断面を観察すると、「インカパープル」は維管束の外側に白色の部分が存在するのに対し、「キタムラサキ」は白色部の面積割合が小さく、「シャドークイーン」は白色部を見るができなかった。塊茎を 0.1 mm の切片とし、透過光により 40 倍で拡大観察したところ、色素を含有する有色細胞と色素を含有しない透明細胞の存在を認めた。アントシアニン色素は水溶性であり、塊茎の植物細胞内で多くの割合を占める液胞内に蓄積されるが、色素を蓄積する細胞（有色細胞）としない細胞（透明細胞）があり、品種によって有色細胞の分布が異なり色素量や目で見た色調も異なっていた。「シャドークイーン」は、「インカパープル」および「キタムラサキ」に比べ明らかに有色細胞の比率が高く、このため濃紫肉色を呈しアントシアニン色素含量が高いと考えられる。「インカレッド」の切断面には、「インカパープル」と同様に維管束の外側に白色の部分が存在し、有色細胞と透明細胞がそれぞれ固まって分布していた。これに対し「ノーザンルビー」は、ほぼ全面が赤色であるが発色が薄かった。細胞の分布を調査すると、「ノーザンルビー」の有色細胞は透明細胞の間にバラバラと分散して広く分布しており、「インカレッド」に比べ発色が薄くなると考えられる。

アントシアニン色素の主成分、含量および色価

「キタムラサキ」、「ノーザンルビー」および「シャドークイーン」の色素は吸光度測定の結果、Harborne (1960)の報告のようにアントシアニン色素と確認された。また、HPLC 分析の結果、3 品種ともアントシアニン色素は約 6 種類程度の色素で構成されていることが分かった。質量分析の結果から、「キタムラサキ」と「シャドークイーン」の主色素は「インカパープル」と同じペタニン (Petanin) であり、「ノーザンルビー」の主成分は「インカレッ

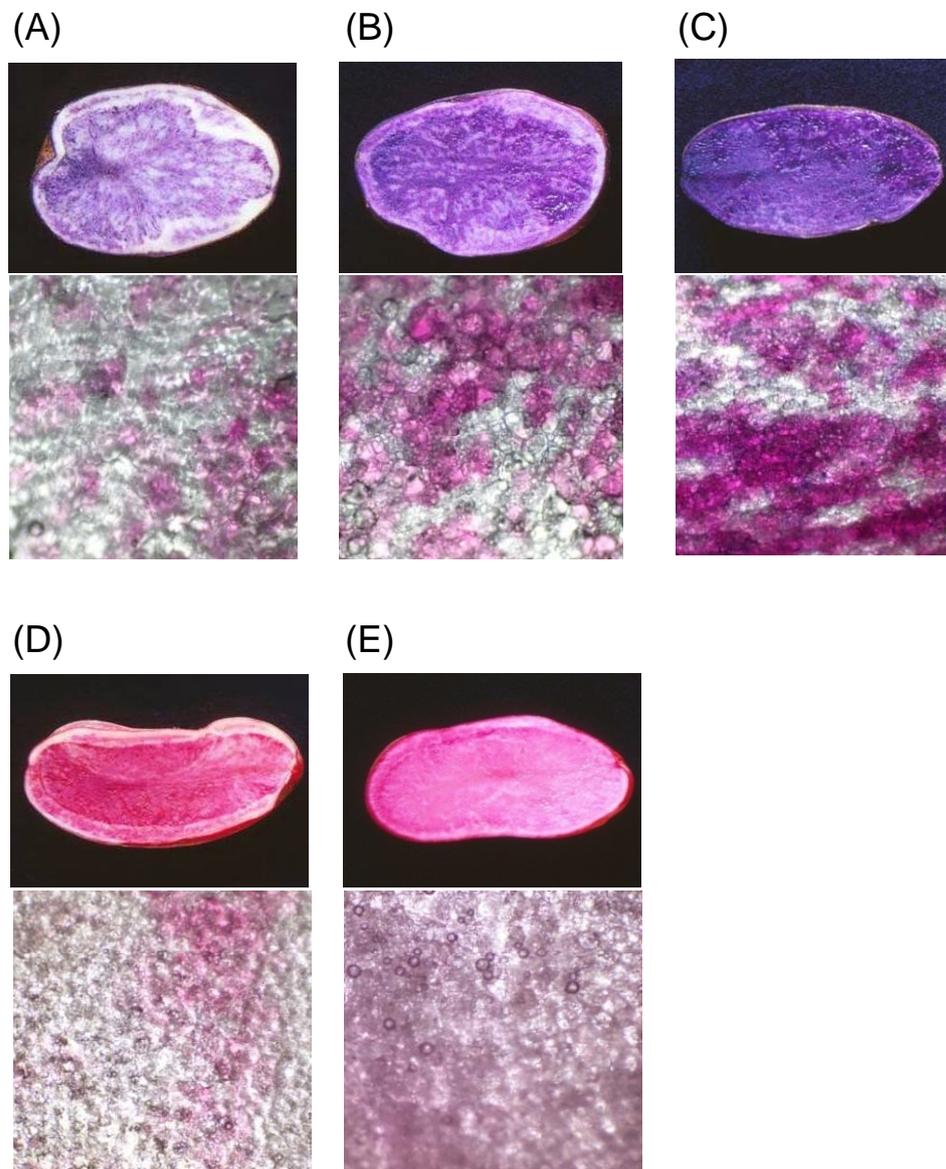


Figure 17. Color (above) and pigment distribution (below) in tuber flesh of newly bred colored potato varieties (A) “Inca Purple”, (B) “Kitamurasaki”, (C) “Shadow Queen”, (D) “Inca Red” and (E) “Northern Ruby”.

ド」と同じペラニン (Pelatin) とそれぞれ推定された (詳細は第 7 章参照)。

塊茎のアントシアニン含量を Table 13 に示した。生いも 100 g 当たり 5 カ年の平均含量は、赤肉の「インカレッド」が 159 mg に対し「ノーザンルビー」が 185 mg とやや多い傾向にあったが、平均値に有意な差は認められなかった。紫肉品種では、「インカパープル」が 204 mg に対し「キタムラサキ」が 254 mg とやや多い傾向にあったが有意差は認められなかった。「シャドークイーン」の色素含量は、生いも 100 g 当たり 740 mg と他の紫肉品種に比べ 3 倍以上の含量があり、他の 4 品種に比較して明らかに有意な差が認められた。

色素原料用サツマイモのアントシアニン色素含量は、生いも 100 g 当たり「山川紫」が 680 mg (Hayashi et al. 1996)、「アヤムラサキ」が 730 mg (津久井ら 1999) であり、「シャドークイーン」の 740mg (Table 13) と同等な水準にある。しかしアントシアニン主色素の成分が異なるため、同一含量であっても発色の程度は異なるものと推測される。そこで、色素原料としての評価を「色価」(原料色素 1 g を 10 ml に溶かした液の色の濃さを表す)をもって行い、その結果を Table 14 に示した。アントシアニン色素含量がほぼ同じである「シャドークイーン」と「アヤムラサキ」を比較すると、「シャドークイーン」の色価が 8.79 u/g であるのに対し、「アヤムラサキ」の色価は 83.27 u/g であり、10 倍近い差が見られた。

【考察】

本研究では、第 2 世代有色バレイショ品種として、「キタムラサキ」およびその放任受粉による結果種子から「ノーザンルビー」と「シャドークイーン」を育成することができた。「キタムラサキ」は、アントシアニン色素を含有し紫肉を呈する「インカパープル」に比べ、塊茎の肥大が早く多収でジャガイモシストセンチュウ抵抗性を有する。「ノーザンルビー」は、アントシアニン色素を含有し赤肉を呈する「インカレッド」に比べ、草型が直立で栽培管理しやすく中早生でジャガイモシストセンチュウ抵抗性を有する。「シャドークイーン」は、上記の紫肉品種「インカパープル」および「キタムラサキ」に比

Table 13 Yearly changes of anthocyanin content (mg/100 g fresh weight) in colored potatoes.

Variety	Flesh	2001	2002	2003	2004	2005	Mean ¹⁾	SD
Inca Red	Red	177	131	239	122	125	159 a	50
Northern Ruby	Red	144	132	255	182	210	185 ab	50
Inca Purple	Purple	175	265	262	195	125	204 ab	60
Kitamurasaki	Purple	211	188	375	269	27	254 b	74
Shadow Queen	Purple	434	596	970	824	874	740 c	19

SD=Standard deviation

¹⁾No significant difference between the mean values shown with the same alphabets by the Friedman test.

Table 14 Color values of the colored potato varieties in comparison with a sweet potato variety “Ayamurasaki”.

Variety	Color value (u/g)	$\lambda_{\text{max-vis}}$ (nm)
Northern Ruby	5.77	504.0
Kitamurasaki	2.87	524.2
Shadow Queen	8.79	523.2
Ayamurasaki ¹⁾	83.27	528.7

¹⁾A sweet potato variety specific for pigment production.

べ、アントシアニン色素を約3倍含有する。このように、栽培しやすく実用性が向上したことにより、家庭菜園や産直販売向けを中心として種イモ需要が増加しており、これら第2世代有色バレイショ品種は、第1世代の「インカパープル」および「インカレッド」に置き換えられ普及されるものと考えられる。

有色バレイショの育成は、これまで「男爵薯」や「メイクイン」しか知らなかった消費者が、意識的に新品種を手にする機会を作り出している。「キタムラサキ」と「ノーザンルビー」は、赤・紫・白の3色を混合したスナック菓子製品の原料として、それぞれ「インカパープル」および「インカレッド」を置き換えて普及が始まった。これにより安定した品質と価格の原料を供給することができるようになった。また「シャドークイーン」は独特な肉色に加え機能性も注目を集め、有色バレイショの調理加工品に色素濃度の高い副原料として加えることにより製品の色を安定させ、さらに色素高含有を生かした機能性食品を開発することによりバレイショ消費拡大に結びつけ生産振興に寄与するものと考えられる。

本研究では有色バレイショの色素原料としての評価も行った。アントシアニン色素含量がほぼ同じである「シャドークイーン」と色素原料用サツマイモ「アヤマラサキ」であっても、後者の色価は10倍近く高かった。つまり同じ原料重量から天然色素製品を製造する場合は、「シャドークイーン」を使うと10倍の原料が必要となる。また色価とは、色素製剤として色素を評価した場合の発色率や被染色物を染める力の評価に当たる。バレイショのアントシアニン色素の場合、色素1g当たりの発色率がサツマイモのアントシアニン色素に比較して1/10であり、通常色素として添加する濃度では、視覚的には10倍の濃度にしないとサツマイモ色素と同等にならないことを意味している。したがって、現状の有色バレイショ品種の色素濃度では、天然色素の原料としての利用は困難と考えられる。

第 7 章

アントシアニン色素の品種・系統間差

【緒論】

バレイショの原産地である南米アンデス地域の塊茎は、多様な形や大きさの他に多様な色や着色パターンを持つことが知られ、このうち赤～紫色はアントシアニン色素によることが知られている (Harbone 1960、Howard et al. 1970、Andersen et al. 1991、石井ら 1996b、Lewis et al. 1998、Naito et al. 1998、Fossen and Andersen 2000)。第 5 章と第 6 章において、普通バレイショの祖先型亜種 *S. tuberosum* ssp. *andigena* を遺伝資源として、高色素含有品種の赤肉品種「インカレッド」および紫肉品種「インカパープル」、さらにこれらの後継品種である赤肉品種「ノーザンルビー」および紫肉品種「キタムラサキ」と「シャドークイーン」の育成について報告した。

先進国において肉部にアントシアニン色素を含有する品種の育成例は極めて希だが、皮部にアントシアニン色素を持つ品種はかなり存在している。アントシアニン色素の植物体中での存在意義については、受粉のための昆虫や鳥の誘因作用、紫外線による植物体 DNA 損傷からの保護、耐病原性 (ファイトアレキシン) 作用などが提唱されている (林 1991)。しかし、地中に産する、バレイショ塊茎での作用については解明されてはいない。アントシアニン類の分布は植物における進化や生育環境に関係が深く、化学的植物分類学

(Chemotaxonomy) の重要な指標になっている (林 1991)。食品においては天然の自然な色調を利用して、伝統的にシソによる梅漬の着色、赤カブ漬、赤ワインなどに用いられてきた。さらに、最近になって多種様々な生理機能性が見いだされ、単に食品の着色機能 (第 2 次機能性) だけではなく、抗酸化性などの第 3 次機能性を持ち、生体内酸化ストレスを防止する食品因子として再評価されている (高宮ら 2004、西川 2008)。

本研究で育成された有色バレイショのアントシアニン色素にも強い抗酸化性 (石井ら 1996a)、抗インフルエンザウイルス活性 (Hayashi et al. 2003)

あるいは抗胃がん活性 (Hayashi et al. 2006) などの機能性を有することが見出されている。

そこで本章では、本研究で育成した有色バレイショ品種も併せ、様々なバレイショの品種・系統についてアントシアニン色素の量と種類から特徴付けを試みた。

【材料と方法】

植物材料

Table 15 に示すように、本研究で育成した有色バレイショ 5 品種とその親系統である *S. tuberosum* ssp. *andigena* の「553-4」系統、「KW85091-21」、「KW85093-33」、「島系 284 号」および「島系 571 号」を併せ、合計 28 品種・系統について、2001～2006 年に北海道農業研究センターで栽培した 50～80 g の大きさの塊茎を用いた。

このうち、「La Soda」、「Red Pontiac」、「Red Warba」および「Desiree」は欧米育成品種、「アイノアカ」、「ベニアカリ」、「レッドムーン」、「アンデス赤」、「紅丸」、「ジャガキッズレッド」、「花標津」および「ジャガキッズパープル」は日本育成品種、「長崎紅」、「釧路産」、「金時薯」、「中津川薯」、「根室紫」および「長崎紫」は来歴不明の在来品種である。

アントシアニン色素の抽出法および色調測定法

アントシアニン色素の抽出は第 5 章に述べた通りである。アントシアニン色素抽出液の可視部の極大波長 ($\lambda_{\text{max-vis}}$) の吸光度 ($E_{\text{max-vis}}$) はスペクトロフォトメーター DU-7500 (Beckman 社) で測定した。

アントシアニン色素の HPLC 分析法

HPLC 分析法は、Inertsil ODS-3 column (4.6 mm I.D. × 250 mm、GL Science Inc.) を装着し、カラム温度を 45 °C とした以外は第 5 章で述べた通りである。

ピーク物質の同定は、精製したペタニンとペラニンを内部標準として用いて、保持時間と λ max-vis が一致するかどうかで行った。

【結果および考察】

各品種のアントシアニン含有量

測定に用いた各品種のアントシアニン色素含有量および色素の含有部位、1%トリフルオロ酢酸（TFA）抽出液の色、可視部の最大吸収波長を Table 15 に示した。

分析に使用した外国育成品種および国内育成品種のうちで、「ジャガキッズパープル」が紫系の皮色を示したが、ほとんどの皮色は赤系であった。「紅丸」、「ジャガキッズパープル」および「ジャガキッズレッド」には果肉に僅かにアントシアニン色素の着色が見られたが、ほとんどが果肉にはアントシアニン色素を含有せず、100 g 生イモあたりのアントシアニン色素含有量は 2 ~ 36 mg と僅かなものであった。在来品種では、「金時薯」と「長崎紫」の果肉にアントシアニン色素が僅かに含まれていた。しかし、在来品種の生イモ中アントシアニン量も 3 ~ 50 mg と少ないものであった。

これに比べ、アントシアニン色素高含有品種として育成した紫色素系の「インカパープル」、「キタムラサキ」および「シャドークイーン」、および赤色素系の「インカレッド」と「ノーザンルビー」のアントシアニン色素含有量は極めて高く（Table 15）、Figure 18 にこれらの品種の系譜とともに親系統も含め、100 g の生イモ当たりアントシアニン含有量を示した。世代を追ってアントシアニン含有量の増加を見てみると、紫色素系品種では、在来品種「根室紫」の 42 mg から始まり、「島系 284 号」の 112 mg を経て「インカパープル」の 212 mg、あるいは同じ「島系 284 号」から「島系 571 号」の 137 mg を経て「キタムラサキ」の 244 mg、そして「シャドークイーン」の 816 mg へと増加し、実に当初の 19.4 倍となった。一方、赤色素系品種は *S. tuberosum* ssp. *andigena* 「553-4」系統の 15 mg に始まり、「KW85093-33」の 45 mg を経て「インカレッド」の 130 mg へと 8.7 倍の増加量を示した。紫色素系品種「キタムラサキ」の放任受粉から得た種子から選抜された「ノーザ

Table 15 Characteristics of anthocyanin in various varieties and breeding lines.

Variety	Color		Flesh	Anthocyanin in flesh	Extract at 1% TFA		Anthocyanin content (mg/100g flesh)
	Skin	Color			Color	$\lambda_{\text{max-vis}}$ (nm)	
Foreign varieties							
Desiree	Red	Red	Light yellow	-	Orange	508	8
La Soda	Red	Red	White	-	Magenta	515	2
Red Pontiac	Red	Red	White	-	Orange	503	3
Red Warba	Red	Red	Light yellow	-	Orange	508	4
Japanese bred varieties							
Aino-aka	Red	Red	Light yellow	-	Orange	506	3
Andes Red	Red	Red	Yellow	-	Orange	506	12
Beni-akari	Red	Red	White	-	Magenta	516	3
Benimaru	Red	Red	White	+	Orange	506	13
Hanashibetsu	Dark red	Dark red	White	-	Purple	514	15
Jaga Kids Purple	Purple	Purple	Yellow	+	Purple	523	36
Jaga Kids Red	Red	Red	Yellow	+	Orange	506	13
Red Moon	Red	Red	Light yellow	-	Orange	508	7
Japanese land races							
Kintoki-imo	Dark red	Dark red	White	+	Magenta	514	12
Kushiro-san	Red	Red	White	-	Orange	506	10
Nagasaki-beni	Red	Red	White	-	Orange	508	3
Nagasaki-murasaki	Purple	Purple	Light yellow	+	Purple	530	50
Nakatsugawa-imo	Red	Red	White	-	Magenta	514	12
Nemuro-murasaki	Purple	Purple	White	-	Purple	530	42
Newly bred colored varieties and their parental lines							
553-4 ¹⁾	Red	Red	Yellow	+	Orange	506	15

KW85093-33	Red	Red	+++	Orange	503	45
KW85091-21	Purple	Purple	+++	Purple	525	77
Shimakei 284	Purple	Purple	+++	Purple	525	112
Shimakei 571	Purple	Purple	+++	Purple	523	137
Inca Purple	Purple	Purple	+++	Purple	523	212
Inca Red	Red	Red	+++	Orange	503	130
Kitamurasaki	Purple	Purple	+++	Purple	525	244
Northern Ruby	Red	Red	+++	Orange	503	195
Shadow Queen	Purple	Purple	+++	Purple	523	816

¹⁾*S. tuberosum* ssp. *andigena*

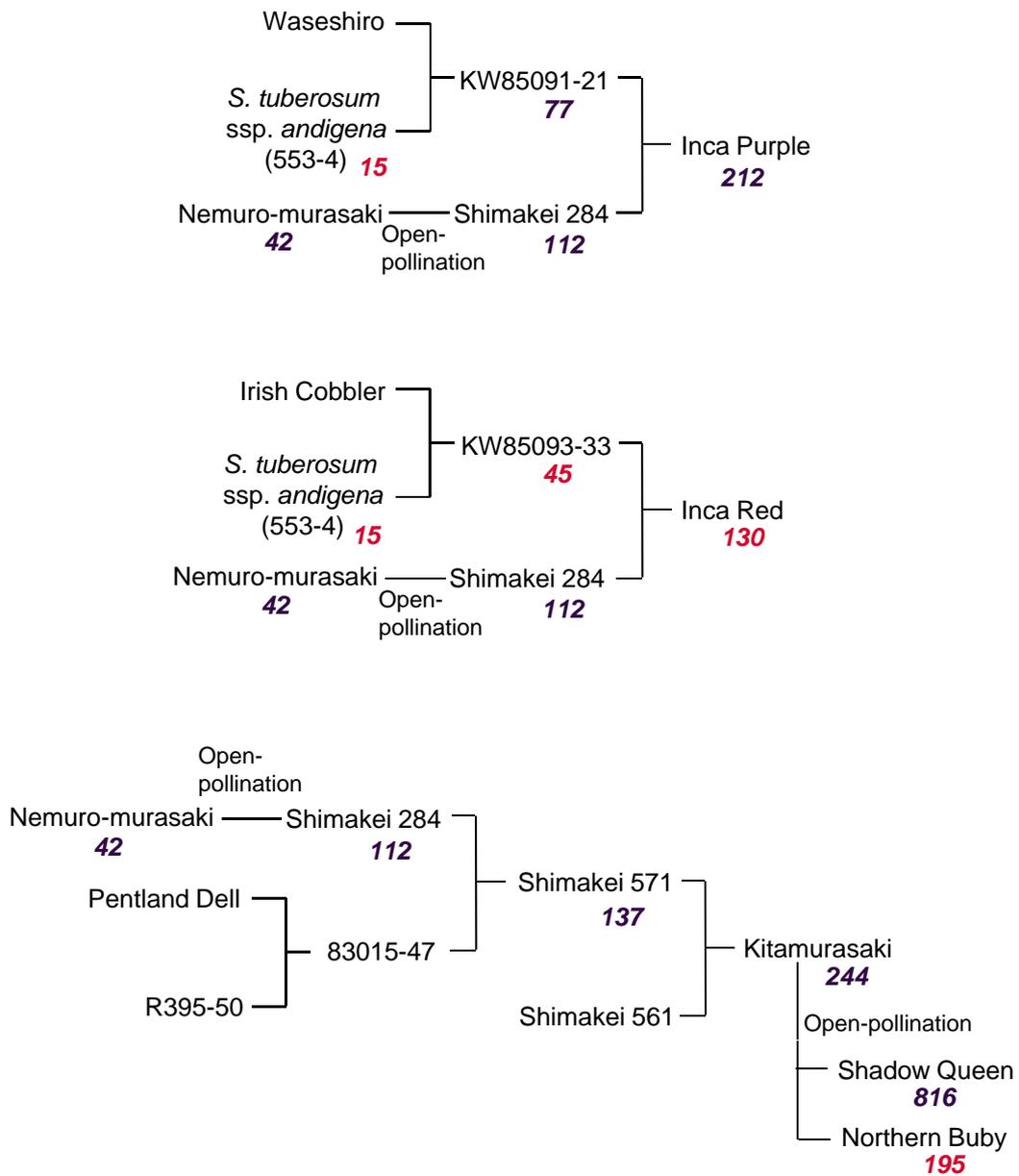


Figure 18. Pedigree of colored potato varieties “Inca Purple”, “Inca Red”, “Kitamurasaki”, “Shadow Queen” and “Northern Ruby”, and the anthocyanin content (mg/100 g flesh) in these and their parental lines. Red- and purple-color in figures indicate red and purple skin tubers.

ンルビー」は赤色を呈し、195 mg と「インカレッド」よりもさらに 1.5 倍含有量が多かった。

以上述べたように、アントシアニン含有量は、選抜により世代ごとに高まることが明らかとなった。このことから、アントシアニン含有量はポリジーンによって支配されていると考えられる。バレイショ育種の歴史において、アントシアニン含有量の向上を目指した品種開発は他に例がなく、どこまで含有量を上げることができるのか分からない。食用と限定した場合、必ずしもアントシアニン含有量のさらなる増加は望ましいとは思われないものの、機能性食品として新たな需要が開拓されれば、アントシアニン含有量のさらなる増加は期待できるものと思われる。

品種・系統の構成色素成分

供試品種・系統から抽出した色素の HPLC 分析を行い、得られた色素ピーク (P) をフォトダイオードアレーで 3 次元検出を行った結果を Table 16 に示した。P3~P8 は 320 nm 付近に強い吸収を示すことから有機酸結合型のアントシアニン色素、逆に P1 と P2 は 320 nm 付近に強い吸収を示さないことから非有機酸結合型と推定された。さらに、P1、P5、P7 は可視部の極大吸収波長 (λ max-vis.) が 503 nm を示すことから Pelargonidin (Pg)系色素、P2、P6、P8 は λ max-vis.が 518~523 nm であることから Cyanidin (Cy)系色素あるいは Peonidin (Pn)系色素、P3、P4 は λ max-vis.が 533 nm を示したことから Petunidin (Pt)系色素と推定された。石井ら (1996) によって明らかにされた、「インカパープル」の主色素ペタニンと「インカレッド」の主色素ペラニンの精製色素を内部標準として用いると、P3 はペタニンと一致し、P5 はペラニンと一致した。

構成色素成分による品種・系統の類別

供試品種・系統において、HPLC 分析の各ピークの占める割合 (%) に基づき 5 つのパターンに類別することができた。A 型はペラニンと Pg-GRFr-G を多く含みペオナニンが少ない品種群で、外国育成品種の「Desiree」、「Red Pontiac」および「Red Warba」と、国内育成品種の「アイノアカ」、「ジャガキッズレッド」および「レッドムーン」がこれに属していた。B 型は、A 型に

Table 16 Anthocyanin composition characterized by HPLC in various varieties and breeding lines.

Peak No.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Other	Type
$\lambda_{\text{max-vis}}$ (nm)	503	523	533	533	503	518	503	523		
Component ²⁾	Pg-GR-G	Pn-GR-G	Petanin	Pn-GRCf-G	Pelanin	Peonanin	Pg-GRFrG	Pn-GRFrG		
Red skin variety										
Aino-aka	2	2	0	0	19	4	25	9	39	A
Desiree	12	3	0	0	37	6	21	4	17	A
Jaga Kids Red	2	1	0	0	45	7	13	3	29	A
Nagasaki-beni	1	2	0	0	15	9	16	16	41	A
Red Pontiac	1	1	0	0	27	4	31	7	29	A
Red Moon	1	1	0	0	41	8	19	10	20	A
Red Warba	1	1	0	0	39	8	21	13	17	A
Kintoki-imo	7	8	0	0	26	12	23	15	9	B
Nakatsugawa-imo	8	10	0	0	24	15	21	15	7	B
Beni-akari	0	0	0	5	8	24	12	29	22	C
Hanashibetsu	3	11	0	0	8	14	9	17	38	C
La Soda	1	2	0	0	19	23	17	11	27	C
Andes Red	0	0	0	0	52	0	16	2	30	D
Benimaru	0	0	0	0	46	0	26	4	24	D
Inca Red	3	0	0	0	71	0	6	0	20	D
Kushirosan	6	2	0	0	45	0	21	4	22	D
KW85093-33	1	0	0	0	73	0	8	0	18	D
Northern Ruby	2	0	0	0	77	0	5	0	16	D
553-4 ¹⁾	5	1	0	0	60	0	18	4	12	D

Purple skin variety	0	2	57	8	0	17	0	3	13	E
Inca Purple	0	2	57	8	0	17	0	3	13	E
Jaga Kids Purple	0	3	44	0	0	19	0	5	29	E
Kitamurasaki	0	1	63	7	0	13	0	2	14	E
KW85091-21	0	1	57	6	0	15	0	1	20	E
Nagasaki-murasaki	0	2	67	17	0	5	0	2	7	E
Nemuro-murasaki	0	3	50	21	0	9	0	7	10	E
Shadow Queen	0	0	72	3	0	14	0	0	11	E
Shimakei 284	0	1	53	7	0	18	0	3	18	E
Shimakei 571	0	1	55	9	0	12	0	3	20	E

¹⁾*S. tuberosum* ssp. *andigena*

²⁾Pg-GR-G (=Pelargonidin 3-rutinoside, 5-glucoside), Pn-GR-G (=Peonidin 3-rutinoside, 5-glucoside), Petanin (=Petunidin 3-p-coumaroyl.rutinoside, 5-glucoside), Pn-GRCf-G (=Peonidin 3-caffeoylrutinoside, 5-glucoside), Pelanin (=Pelargonidin 3-p-coumaroylrutinoside, 5-glucoside), Peonanin (=Peonidin 3-p-coumaroylrutinoside, 5-glucoside), Pg-GRFr-G (=Pelargonidin 3-feruloylrutinoside, 5-glucoside), Pn-GRFF-G (=Peonidin 3-feruloylrutinoside, 5-glucoside).

近くペラニン（P5）を主色素とするが、ペオナニンや Pn-GR-G のような紫系色素を多く含み、在来品種の「金時薯」と「中津川薯」がこれに属した。両品種の色素構成比は極めて類似しており、DNA 分析による結果でも両品種は同一遺伝子型と推定され（保坂 私信）、異名同種であることを裏付けている。C 型も A 型に近いが紫系色素のペオナニンが主色素となる品種群であり、「ベニアカリ」、「花標津」および「La Soda」がこれに属していた。D 型は「インカレッド」に代表されるようにペラニン（P5）を主色素とする品種群で、45%以上をペラニンが占め、ペオナニン（P6）は全く含まれなかった。この一群には「インカレッド」の育成に関わった系統の他に国内育成品種の「アンデス赤」と「紅丸」、および在来品種である「釧路産」が含まれていた。以上の A~D 型に属する品種・系統の皮色は、すべて赤系であった。紫系の皮色をもつ品種・系統は、すべて同一の E 型としてまとめることができた。すなわち、ペラニンを全く含まず、ペタニン（P3）が 44%を占めていた。

D 型に属する「アンデス赤」のプロトクローン変異体として出現した「ジャガキッズレッド」と「ジャガキッズパープル」（岡村ら 1991）が、それぞれ A 型と E 型に分類されたことから、極めて少数の遺伝子変異により異なる皮色変異が生じていると考えられる。

第 8 章

総合考察

本研究では、我が国のバレイショは、全体として見ると非常に遺伝的多様性に富んだ遺伝子プールを形成していることを明らかにし、このような多様な育種素材を用いることによって様々な新規品種を創成できることを実証的に明らかにすることができた。すなわち、ジャガイモシストセンチュウ抵抗性母本系統「R392-50」の育成には、アメリカから導入した「Hudson」と「Wauseon」が使われ、「インカのめざめ」の育成には2倍体栽培種 *S. phureja* の遺伝質が、また、有色バレイショ品種群の育成には日本在来品種「根室紫」とアンデス原産4倍体栽培バレイショ *S. tuberosum* ssp. *andigena* の遺伝質を有効に利用することにより可能となった。

日本在来コムギ品種「達磨」に由来する半矮性遺伝子がメキシコにおいて利用され、台湾在来イネ品種「低脚烏尖」の半矮性遺伝子が「IR-8」の育成に使われ、いわゆる「緑の革命」を引き起こしたことは遺伝資源の重要性を如実に語るものであろう (Chrispeels and Sadava 1994)。バレイショ育種においても、豊富に存在する近縁野生種を含めた遺伝資源は歴史的にも大きな役割りを果たしてきたし、ますます重要性は高まっている (Huamán 1983、Ross 1986、Hanneman 1989、Plaisted and Hoopes 1989、Hawkes 1990)。しかし、多くの場合、病虫害抵抗性遺伝子の供給源として遺伝資源が利用され、味や色素、あるいは食品としての機能性を向上させるために育種に使われた例は著者の知る限りバレイショでは本研究が初めてである。すなわち、「インカのめざめ」は先進国としては初めての2倍体品種であり、有色バレイショ品種群も肉色に対して選抜を行い品種となった初めての例である。

Figure 19 は、ジャガイモシストセンチュウ抵抗性遺伝子 H_1 が「R390-50」に由来する育成品種の年次別栽培面積を示したもので、「とうや」(1992年育成、「R392-50」×「WB77025-2」)をはじめ栽培面積が年を追って伸びており、2006年で4,580 haに達している。「インカのめざめ」は、当初は産直販売向けの小規模栽培を中心に普及し、続いてインターネットやカタログ販売、園芸種苗店やホームセンターの園芸コーナーなど、個人向けの種イモ販売が増加した。その後、大都市を中心とする実需側か

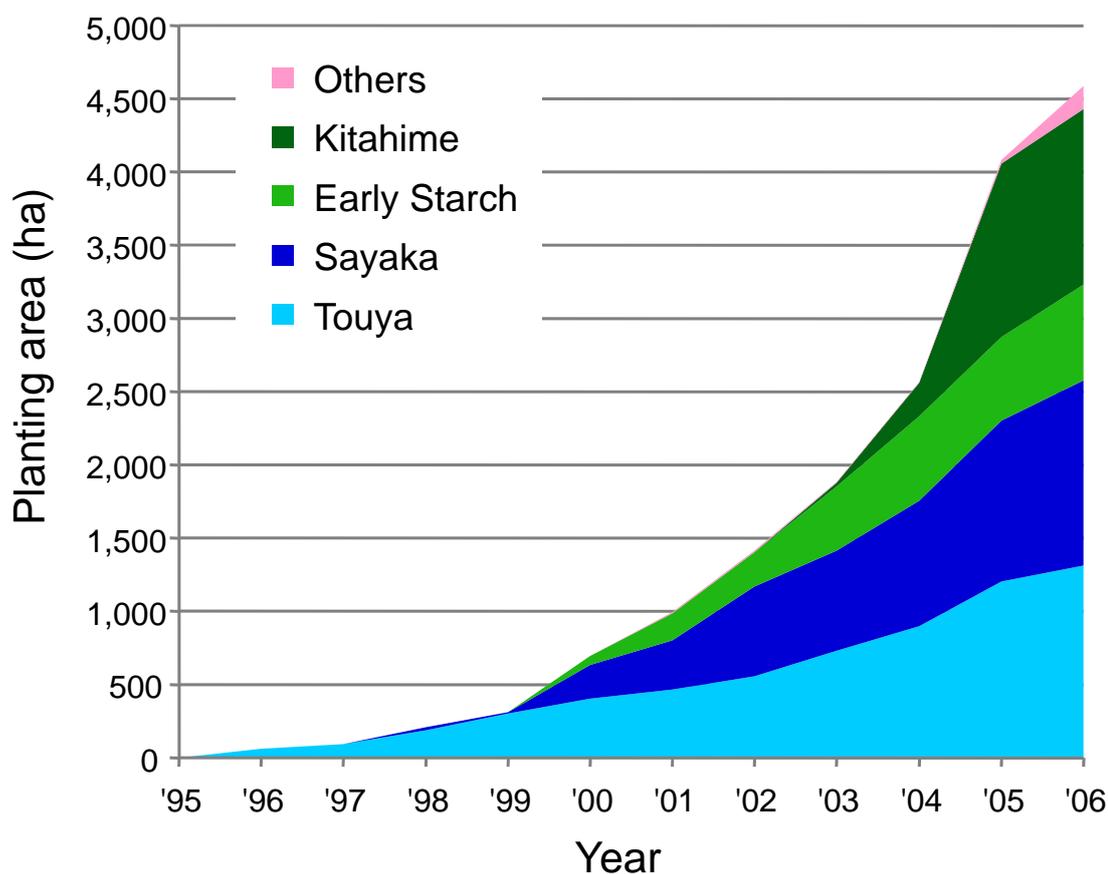


Figure 19. Yearly changes in planting areas of the varieties which possess the cyst nematode resistance gene H_1 derived from R390-50 (data compiled from Anonymous 2009a). The others include “Natsufubuki”, “Beniakari”, “Aiyutaka”, “Hanashibetsu”, “Hikaru”, “Kitamurasaki”, “Yukitsubura”, “Ran-ran Chip”, “Star Ruby” and “Northern Ruby”.

らの要望に応える形でJAなどによる組織的な栽培も徐々に増加し、2006年に栽培面積は110 haに達している。また、Figure 20は有色バレイショの年次別栽培面積を表したもので、「インカパープル」は2006年には28.3 ha、「インカレッド」では35.7 haに達した。その後、これら第1世代の有色バレイショに代わって、栽培特性に優れた第2世代有色バレイショ品種「キタムラサキ」、「ノーザンルビー」および「シャドークイーン」が栽培面積を増やし、2009年には、原原種の配布量から推定して栽培面積は160 haに達しているものと考えられる。

Table 17は、栽培面積の品種別年次変化を、2006年度で最も栽培面積の多い品種から順に並べたものである。青果用2大品種「男爵薯」と「メイクイン」は明らかに減少傾向にあり、我が国全体のバレイショ栽培面積も減少傾向にある。でん粉原料用品種がかつての「紅丸」と「農林1号」から「コナフブキ」へと代わり、ポテトチップ用品種「トヨシロ」の一部が「スノーデン」に代わってきている。また、西南暖地で栽培されている青果用品種「デジマ」が「ニシユタカ」に置き換わってきている。このような現状にあって、栽培面積を伸ばしているのは、「男爵薯」×「Tunika」から育成されジャガイモシストセンチュウ抵抗性遺伝子 H_1 を持つ「キタアカリ」と、本研究で育成された「R390-50」に由来するジャガイモシストセンチュウ抵抗性品種群、「インカのめざめ」および有色バレイショ品種群である。

したがって、本研究で掲げたバレイショ育種における2つの課題、すなわち1) 既存イメージを打ち壊すことのできるほどの品種を創出すること、および2) 効率良くジャガイモシストセンチュウ抵抗性品種を育成するための育種母本の育成は、上述したように育成された品種の栽培面積が増加傾向にあることから判断して、ある程度解決できたと考えられる。個性的で一芸に秀でた品種や一目で分かる区別性のある品種は、新しい需要を切り開き食生活を豊かにする。このような意味では、「インカのめざめ」や第一世代有色バレイショ「インカレッド」と「インカパープル」、および第二世代有色バレイショ「キタムラサキ」、「シャドークイーン」および「ノーザンルビー」は、我が国のバレイショ育種において大きな役割りを果たしたと考えられる。

しかし汎用性がなければ大面積で栽培されない。つまり良品は市場出荷向けに振り分け、規格外はコロケ、さらに品質が落ちてマッシュ、最後はでん粉原料とする。このように利用範囲の広い汎用性の高い品種は、出荷調整

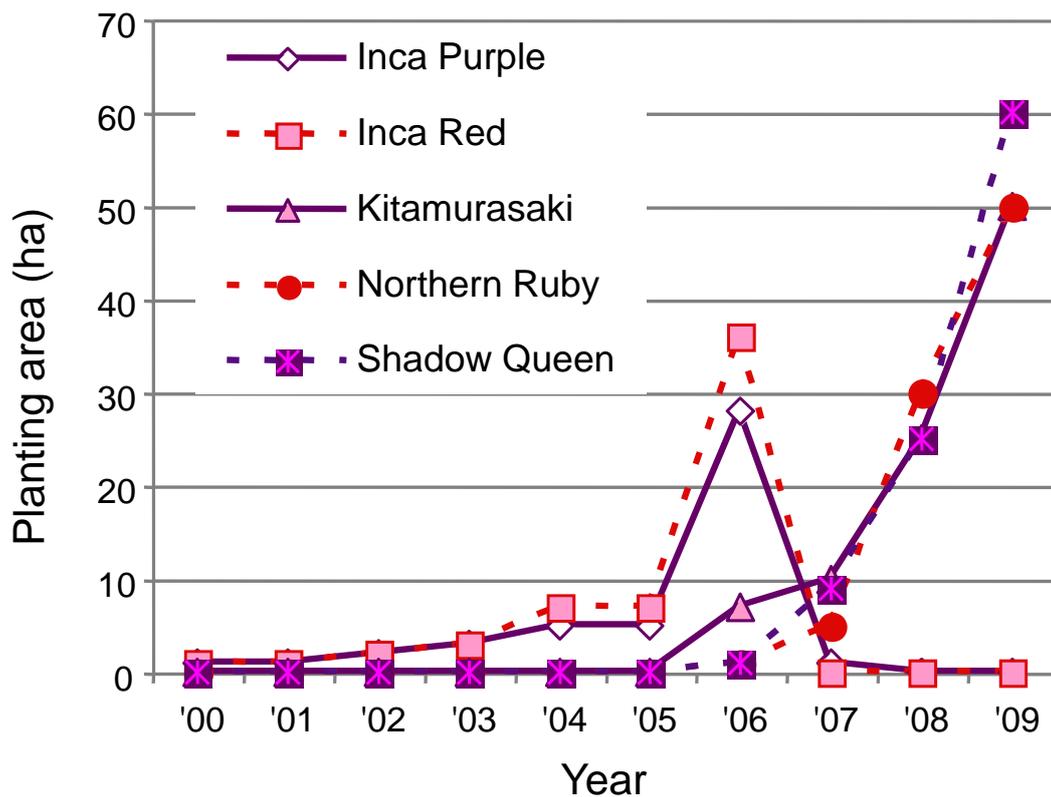


Figure 20. Yearly changes in planting areas of colored potato varieties “Inca Purple”, “Inca Red”, “Kitamurasaki”, “Shadow Queen” and “Northern Ruby”. Planting areas after 2007 were estimated by the supply of foundation seed potato. Data were compiled from Anonymous (2009a, b).

能力が高く、生産物全体として利益回収率が高い。我が国では「男爵薯」がこれに当たり、アメリカでは「Russet Burbank」がこれに相当する。また、平常年では多収であっても低温多湿や高温干ばつなどの不良年では著しく少収となる品種がある一方で、気象条件に関わらず比較的安定した収量を示す品種も存在する。安定性の高い品種の開発は、近年の地球温暖化と気象変動の激化や環境負荷軽減の観点から重要な目標である。さらに農産物貿易の自由化に対する圧力は増す一方であり、輸入品と対抗して国産バレイショを振興するためには、業務向けと食品加工向け需要に品質の良さで応え、生産面からも供給面からも安定性を高めることにより、実需者の要望に応え消費を支える必要がある。このために特殊性と用途適性を向上させつつ、汎用性と安定性を拡大したバランスに優れた品種群を開発することが今後必要とされるであろう。

Table 17 Yearly and variety changes in potato planting areas in Japan (ha), cited from Anonymous (2009a). Varieties shown in red harbor the R390-50-derived cyst nematode resistance gene H₁. “Inca-no-mezame” and colored potatoes are shown in blue and green, respectively.

Variety ¹⁾	1980	1985	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
Irish Cobbler*	49,470	42,759	39,581	33,008	32,846	33,001	32,186	30,756	29,980	28,682	26,519	24,983	23,597	22,453	21,129	
Konafubuki		2,757	5,670	11,300	11,300	11,940	13,300	14,634	14,220	14,004	15,185	15,436	16,575	16,865	16,726	
May Queen*	18,319	21,633	19,736	15,751	16,027	15,394	13,965	14,469	13,628	13,274	12,759	11,814	10,944	10,574	10,269	
Toyoshiro	3,134	6,913	8,378	8,065	8,710	8,991	9,209	9,385	9,114	9,573	9,943	10,386	9,515	9,253	9,182	
Nishiyutaka	497	1,638	4,129	4,570	4,819	5,195	4,815	4,951	5,633	5,850	6,439	5,765	5,648	5,871	5,919	
Kita-akari				311	311	422	665	897	1,288	2,079	2,038	2,147	2,578	2,612	3,009	
Dejima	5,326	4,810	4,534	2,476	2,858	2,717	2,899	3,031	2,975	3,069	2,804	2,562	2,431	2,415	2,493	
Hokkaiogane		527	1,250	1,670	1,550	1,760	2,340	2,180	2,108	1,992	2,028	1,875	1,760	1,932	1,840	
Waseshiro	1,080	3,437	3,786	3,613	3,475	3,253	3,403	3,363	3,113	2,659	2,642	2,161	2,073	1,798	1,533	
Snowden*							325	369	536	778	1,228	967	1,374			
Touya					60	90	190	301	405	463	555	730	898	1,203	1,312	
Norin I	14,952	10,655	7,542	6,538	5,175	5,179	4,336	3,889	3,231	2,922	2,612	2,105	1,697	1,356	1,287	
Sayaka							17	9	229	336	614	682	857	1,097	1,266	
Kitahime												27	226	1,181	1,200	
Benimaru	21,026	26,037	16,671	11,934	10,300	8,406	6,661	5,006	3,880	3,630	2,474	2,167	1,677	1,520	1,119	
Early Starch									60	188	234	440	579	574	650	
Astarte*				40	410	980	720	587	386	335	430	343	379	438	483	
Eniwa	4,214	2,571	1,380	1,180	1,200	1,050	950	700	440	358	282	214	187	183	158	
Sakurafubuki							480	966	1,112	438	261	305	213	229	150	
Inca-no-mezame												20	39	96	110	
Matilda*				60	70	84	100	114	126	123	108	93	89	100	100	
Atlantic*				190	80	190	260	245	252	252	160	74	64	79	89	
Musamaru				320	320	310	130	154	88	72	66	78	72	110	86	
Tokachikogane								6			4	4	11	49	70	
Natsufubuki															67	
NorthChip								17	58	17	57	47	76	0	53	
Beniakari								63	60	60	60	60	69	43	50	
Aiyutaka												3	7	21	41	
Inca Red															7	36

【要 旨】

第1章では、バレイショ (*Solanum tuberosum* L.) の起原や歴史、我が国における生産と消費動向、およびバレイショ育種の現状について概説し、バレイショ育種における課題の抽出を試みた。バレイショは、アンデス山脈の中央高原地帯にあるチチカカ湖周辺で、少なくとも7,000年前から栽培され、スペイン人が新大陸でバレイショを初めて目にしてから70年たらずの慶長年間に日本へ伝来した。現在、国民一人当りの年間消費量は1990年以降は17~18 kgで推移しているとは言え、主力品種は、1908年に導入された「男爵薯」と1917年に導入された「メークイン」で、一般には「丸ければ男爵薯、長ければメークイン」の認識が浸透している。この2品種以外は、単に無名のバレイショとして扱われることが多く、数多くの新品種が2大品種の壁に敗れている。そこでバレイショ育種における第1の課題は、多様化した消費者の需要に対して用途を提示し、既存イメージを打ち壊すことのできるほどの品種を創出することであると考えられる。一方、近年ジャガイモシストセンチュウによる被害が深刻な問題となっており、全国の発生面積は1万 haに達しさらに増加傾向にある。そこでバレイショ育種における第2の課題は効率良くシストセンチュウ抵抗性品種を育成するための育種母本の育成であると考えられる。これらの課題に対応するためには、我が国が保有する遺伝資源に十分な遺伝的変異を有していることが肝要である。

第2章では、最も簡便なDNA多型の検出方法であるRandom amplified polymorphic DNA (RAPD)法を利用し、1992年までに育成された農林3号を除くすべての命名登録品種36品種を含め、73の品種・系統の遺伝的多様性を明らかにしようと試みた。31プライマーから検出された84本のRAPDバンドによって73の供試品種・系統のうち67を他と明確に識別することができた。さらに、命名登録品種に限れば、5プライマーの15バンドですべてを識別することができた。識別できなかったのは、異名同系統と考えられる在来品種の一群、および親品種とその体細胞突然変異体であった。クラスター分析によって供試品種・系統は3つに大別することができた。第1のグループは日本の育成品種や在来品種、および「男爵薯」と「ND860-2」からなっていた。第2グループは多くの育成品種や在来品種の他に、欧米品種の大半がこのグループに属

していた。第3グループはアンデス原産栽培バレイショの影響を色濃く残した一群であった。したがって、我が国のバレイショは、ヨーロッパにもたらされた初期のバレイショから、「男爵薯」を基幹的な遺伝的背景としてアンデスの栽培種や野生種の遺伝質を取り込み高度に改良された品種に至るまで、全体として見ると非常に多様な遺伝子プールを形成しているものと考えられる。

第3章では、我が国で問題となっているジャガイモシストセンチュウのパソタイプ Ro1 に対して完全な抵抗性を示す、アンデス原産4倍体栽培バレイショ *S. tuberosum* ssp. *andigena* に由来する単一優性遺伝子 H_1 を効率良く付与するための育種母本の育成を行った。二重式遺伝子型 ($H_1H_1h_1h_1$) 品種「Hudson」と一重式遺伝子型 ($H_1h_1h_1h_1$) 品種「Wauseon」の子である R392 系統群について常法の育種法に従い個体選抜、系統選抜を経て実用形質に優れる30系統を選抜した。このうちの12系統について感受性品種「トヨシロ」ないし「北海62号」と交配し、実生幼苗を用いて抵抗性の有無を調査した。この結果、「R392-50」を親系統とすると97.6%が抵抗性を示したことから、「R392-50」は三重式遺伝子型 ($H_1H_1H_1h_1$) と考えられた。三重式遺伝子型個体を片親として用いると、その後代において少なくとも96.4%の高頻度で抵抗性個体の出現が期待されるため、実生世代でのセンチュウ抵抗性検定を省略し、生産力検定予備試験終了後に抵抗性の確認の検定を行うのみで実用上十分となり、多くの抵抗性品種の育成に寄与することができた。

第4章では、アンデス原産2倍体栽培種の独特な食味と風味を残しつつ、日本のような長日長条件でも栽培できるような品種育成を行った。橙黄肉色の2倍体雑種系統「P10173-5」と、長日適応性に優れ塊茎形成能力が高い「W822229-5」を交雑し、日本で初めての2倍体品種である「インカのめざめ」を育成することができた。4倍体普通品種に比べ収量は劣り、塊茎の休眠が短く貯蔵性に劣るが、その橙黄肉色と独特の良食味を持つため、消費の現場において「男爵薯」を超えうる画期的な品種であると考えられた。

第5章では、新規の需要を創出して国産バレイショの振興を図ることを目的とし、栽培・生産側ではなく積極的な販売・消費側を意識し肉色が呈色する有色バレイショの育成を試みた。紫皮白肉の北海道在来品種「根室紫」の自

然結果種子に由来する系統と、*S. tuberosum* ssp. *andigena* 「553-4」との交雑に由来する系統より、紫皮で紫肉の「インカパープル」と、赤皮で赤肉の「インカレッド」を育成することができた。「インカパープル」は、アントシアニン色素を生イモ 100 g 当たり平均 174 mg を含有し、「インカレッド」は 179 mg を含有していた。栽培特性は劣るが、色彩という面で新規な食材であるばかりでなく、アントシアニン色素による抗酸化力や抗インフルエンザウイルス活性などの高い機能性を有しており、需要の拡大に貢献できるものと考えられる。

第 6 章では、より栽培特性や色素含量を向上させた第 2 世代の有色バレイショの育成を試みた。前章と同様に紫皮白肉の在来品種「根室紫」の自然結果種子に由来する系統を元に、ジャガイモシストセンチュウ抵抗性を有し実用性の優れた白肉系統を交配し、さらに中早生でジャガイモシストセンチュウ抵抗性と油加工適性を有する系統を交配することにより、紫肉色でジャガイモシストセンチュウ抵抗性を持ち、かつ収量性も優れた「キタムラサキ」を育成した。さらに「キタムラサキ」の放任受粉による後代から赤肉で栽培しやすくジャガイモシストセンチュウ抵抗性を持つ「ノーザンルビー」、およびジャガイモシストセンチュウ抵抗性は有しないが有意にアントシアニン含量の高い濃紫肉の「シャドークイーン」を育成した。「シャドークイーン」の生イモ 100 g 当たりアントシアニン色素含量は 740 mg で、色素原料用サツマイモ「アヤムラサキ」の 730 mg と同等水準にあったが、「色価」は 8.79 u/g で、「アヤムラサキ」の色価 (83.27 u/g) に比べ 1/10 程度であり、天然色素原料としての利用は困難と考えられた。

第 7 章では、本研究で育成した有色バレイショ品種も併せ、皮に着色のある 28 品種・系統についてアントシアニン色素の量と種類から特徴付けを試みた。紫色素系品種では、100 g の生イモ当たりアントシアニン含有量は在来品種「根室紫」の 42 mg から始まり、「インカパープル」の 212 mg、「キタムラサキ」の 244 mg、そして「シャドークイーン」の 816 mg へと増加し、実に 19.4 倍の増加を示した。一方、赤色素系品種は *S. tuberosum* ssp. *andigena* 「553-4」系統の 15 mg に始まり、「インカレッド」の 130 mg、「ノーザンルビー」の 195 mg と増加した。したがって、アントシアニン色素の量はポリジーンによって支配されているものと考えられる。HPLC 分析の各ピークの占める

割合を元に、供試品種・系統は赤系皮色を持つ A～D 型と、紫系皮色を持ちペタニン色素を主成分とする E 型の 5 つに類別することができた。D 型に属する「アンデス赤」のプロトクローン変異体として出現した「ジャガキッズレッド」と「ジャガキッズパープル」が、それぞれ A 型と E 型に分類されたことから、極めて少数の遺伝子変異により異なる皮色変異が生じていると考えられた。

第 8 章では、以上の研究結果をとりまとめ総合的に考察した。「インカのめざめ」は先進国としては初めての 2 倍体品種であり、有色バレイショ品種群も肉色に対して選抜を行い品種となった初めての例で、多様な育種素材を用いることによってこそ様々な新規品種を創成できたことを述べ、世界に先駆け、味や色素、あるいは食品としての機能性を向上させるために遺伝資源が有効に使われたことを示した。また、我が国のバレイショ栽培面積が漸減する中で、本研究で育成された品種は着実に栽培面積を伸ばしていることから、第 1 章で掲げた課題をある程度解決できたものと考えられる。しかし、個性的で一芸に秀でた品種や一目で分かる区別性のある品種は、新しい需要を切り開き食生活を豊かにするものの、汎用性がなければ栽培面積の拡大は困難である。特殊性と用途適性を向上させつつ、汎用性と安定性を拡大したバランスに優れる品種群を開発することが今後ますます必要とされるであろう。

【謝 辞】

本論文をとりまとめるにあたり、神戸大学大学院農学研究科附属食資源教育研究センター教授 保坂和良博士には、終始懇切なご指導とご助言を頂き、さらにご校閲を賜りました。心より感謝申し上げます。また、神戸大学大学院農学研究科教授 伊藤一幸博士および石井尊生博士には、詳細なご校閲と貴重なご意見を賜りました。謹んで感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、東京家政学院短期大学生活科学科教授 林一也博士には、貴重なご助言とご協力を頂き、有色バレイショの研究においては共同研究を推進し投稿論文の詳細なご校閲とご意見を賜りました。心より感謝申し上げます。北海道農業試験場元室長（故）梅村芳樹氏には、新品種を如何に普及するかのバレイショ育種戦略についてご指導を賜り、特に原産地や諸外国での体験談は研究の動機付けとなりました。心より感謝申し上げます。

（故）入倉幸雄博士は、北海道農業試験場において長年にわたり近縁栽培種や野生種を利用した母本育成を行い多数の遺伝資源を保存しました。本研究はこの遺伝資源なくして遂行することは不可能であり、偉大な功績に敬意を払い感謝申し上げます。また松永浩氏は、北海道立根釧農業試験場において、肉質部に色素を含有する系統を選抜し遺伝資源として保存されました。その先見性に敬意を払い感謝申し上げます。

DNA マーカーを用いた遺伝資源の評価を手がける機会を与えて頂いた神戸大学農学部元教授 金田忠吉博士、米国品種試料を提供し共に品種識別の研究を行ったカルビーポテト（株） 小川慶一氏、ジャガイモシストセンチュウ抵抗性育種のご指導を頂いた北海道農業試験場元室長 西部幸男氏、米国コーネル大学から交配種子 R392 を導入されシスト線虫の抵抗性検定を推進された北海道農業試験場元場長 稲垣春郎博士に謹んで感謝申し上げます。

北海道農業試験場および北海道農業研究センターでバレイショ育種研究に取り組んだ高田明子氏、米田勉氏、木村鉄也博士、小林晃博士、津田昌吾氏、高田憲和氏、中尾敬氏、吉田勉氏、向島信洋氏に深く感謝申し上げます。また、遠藤千絵博士には、品質生理の研究分野から大きなご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。さらに、育種研究と協力してシストセンチュウ抵

抗性検定を担当した気賀沢和男博士、三井康博士、清水啓博士、相場聡氏、百田洋二氏、串田篤彦氏、植原健人博士に深く感謝申し上げます。

バレイショアントシアニン色素の研究においてご協力頂いた東京家政学院短期大学 管理栄養士 綿貫仁美氏、東京家政学院大学家政学部（現神戸松蔭女子大学） 片平理子博士、南九州大学 寺原典彦博士、食品総合研究所（現農林水産省） 小野裕嗣博士、日農化学工業（株） 椎名隆次郎氏に深く感謝申し上げます。

有色バレイショ品種育成の交流共同研究を推進した元（株）浅田飴 草野尚氏、育成品種の現地栽培適性評価の陣頭指揮を執って頂いた十勝農業協同組合連合会 高橋英三氏、実需レベルで調理評価を実施したふく井ホテル 長屋壯重氏、生産振興を担当した JA 幕別町 杉山勝彦氏、山内浩一氏、下山一志氏、およびカラフルポテト研究会、ポテトチップ加工テストを実施した（有）菊水堂 岩井菊之氏、食品としての栄養評価を実施した女子栄養大学、新品種の販売リスクを負担して市場性評価を推進した和田製糖（株）、小面積の需要にも応える種いも生産の積極的な取り組みをした JA 大樹町、新品種の種イモ流通を推進した（株）ジャパンプオテトおよび雪印種苗（株）、有色バレイショ品種の組織的な生産によるスナック菓子原料の供給体制を確立し産直販売所での商品揃えとして販売を推進した JA 芽室町、有色バレイショを原料とする新規商品開発に取り組んだカルビー（株）、系統適応性検定試験および耐病虫性特性検定試験の担当者には、それぞれの専門分野でご尽力頂きました。また、日本いも類研究会には、家庭菜園からの需要掘り起こしとして新品種の試験栽培用種イモ配布事業でご尽力頂きました。さらに、北海道農業研究センターの技術専門職員 和田勝喜氏、斉藤真一氏、平田秀幸氏、成田優司氏、高橋洋幸氏、高倉朋宏氏、中村誠二氏、平直樹氏、森住淳氏、山田智久氏ならびに非常勤職員各位には、育種試験を支える圃場管理や品質調査などの業務にご尽力頂きました。事務職員各位には、育種研究に関わる事務会計業務にご尽力頂きました。ここに記して、深く感謝申し上げます。

最後に、本研究を遂行するにあたり、投稿論文の表現を適切に校正してくれた妻エリ子と暖かい激励と協力を惜しまなかった子供達の存在を明記します。

本研究が、いかに数多くの方々のご協力のもとに行われたかを総て書

き留めることができません。心より謝意を表します。

【引用文献】

- 相場聡・稲垣春郎（1992） ジャガイモシストセンチュウ. 線虫研究の歩み
（日本線虫研究会）. pp. 121-124.
- 安孫子孝次（1968） 北海道農業よもやま話. 安孫子孝次氏胸像建設の会, 札幌.
pp.113-124.
- Allard, R.W. (1960) Principles of plant breeding. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Andersen, O.M., S. Opheim, D.W. Aksnes and N.A. Froystein (1991) Structure of petanin, and acylated anthocyanin isolated from *Solanum tuberosum*, using homo-nuclear and hetero-nuclear 2-dimensional nuclear magnetic resonance techniques. Phytochem. Anal. 2: 230–236.
- Anonymous (2009a) いも・でん粉に関する資料. 農林水産省生産局生産流通振興課
- Anonymous (2009b) 登録・出願品種に係る増殖及び配布実績報告書.
（独）種苗管理センター.
- 浅間和夫（1978） ジャガイモ 43 話. 北海道新聞社, 札幌.
- Beckmann, J.S. and M. Soller (1986) Restriction fragment length polymorphisms and genetic improvement of agricultural species. Euphytica 35: 111-124.
- Bornet, B., F. Goraguer, G. Joly and M. Branchard (2002) Genetic diversity in European and Argentinian cultivated potatoes (*Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum*) detected by inter-simple sequence repeats (ISSRs). Genome 45: 481–484.
- Braun, A. and G. Wenzel (2005) Molecular analysis of genetic variation in potato (*Solanum tuberosum* L.). I. German cultivars and advanced clones. Potato Res. 47: 81–92.
- Brodie, B.B. (2001) Potato cyst nematodes. In: Compendium of Potato Diseases, second edition (edited by W.R. Stevenson, R. Loria, G.D. Franc and D.P. Weingartner). APS Press, St. Paul, Minnesota, USA. pp. 48-50.
- Brown, C.R., C.G. Edwards, C.-P. Yang and B.B. Dean (1993) Orange flesh trait in potato: Inheritance and carotenoid content. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 118: 145–150.
- Chrispeels, M.J. and D.E. Sadava (1994) Plants, genes, and agriculture. Jones and Bartlett Publishers, Boston and London.

- De Jong, H. (1991) Inheritance of anthocyanin pigmentation in the cultivated potato: A critical review. *Amer. Potato J.* 68: 585-593.
- Demeke, T., L.M. Kawchuk and D.R. Lynch (1993) Identification of potato cultivars and clonal variants by random amplified polymorphic DNA analysis. *Amer. Potato J.* 70: 561-570.
- Desborough, S. and S.J. Peloquin (1968) Potato variety identification by use of electrophoretic patterns of tuber proteins and enzymes. *Amer. Potato J.* 45: 220-229.
- Douches, D.S. and K. Ludlam (1991) Electrophoretic characterization of North American potato cultivars. *Amer. Potato J.* 68: 767-780.
- Douches, D.S., K. Ludlam and R. Freyre (1991) Isozyme and plastid DNA assessment of pedigrees of nineteenth century potato cultivars. *Theor. Appl. Genet.* 82: 195-200.
- Dowley, L.J. and E. O'Sullivan (1995) A short history of the potato, the Famine, late blight and Irish research on *Phytophthora infestans*. Oak Park Research Center Carlow.
- Doyle, J.J. and J.L. Doyle (1987) A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochem. Bull.* 19: 11-15.
- Dweikat, I., S. Mackenzie, M. Levy and H. Ohm (1993) Pedigree assessment using RAPD-DGGE in cereal crop species. *Theor. Appl. Genet.* 85: 497-505.
- Feingold, S., J. Lloyd, N. Norero, M. Bonierbale and J. Lorenzen (2005) Mapping and characterization of new EST-derived microsatellites for potato (*Solanum tuberosum* L.). *Theor. Appl. Genet.* 111: 456-466.
- Fossen, T. and O.M. Andersen (2000) Anthocyanins from tubers and shoots of the purple potato, *Solanum tuberosum*. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75: 360-363.
- Fukuoka, S., K. Hosaka and O. Kamijima (1992) Use of random amplified polymorphic DNAs (RAPDs) for identification of rice accessions. *Jpn. J. Genet.* 67: 243-252.
- Ghislain, M., D.M. Spooner, F. Rodriguez, F. Villamon, J. Nunez, C. Vasquez, R. Waugh and M. Bonierbale (2004) Selection of highly informative and user-friendly microsatellites (SSRs) for genotyping of cultivated potato. *Theor. Appl. Genet.* 108: 881-890.
- Ghislain, M., D. Andrade, F. Rodríguez, R.J. Hijmans and D.M. Spooner (2006)

- Genetic analysis of the cultivated potato *Solanum tuberosum* L. Phureja Group using RAPDs and nuclear SSRs. *Theor. Appl. Genet.* 113: 1515–1527.
- Görg, R., U. Schachtschabel, E. Ritter, F. Salamini and C. Gebhardt (1992) Discrimination among 136 tetraploid potato varieties by fingerprints using highly polymorphic DNA markers. *Crop Sci.* 32: 815-819.
- Hanneman, R.E. Jr. (1989) The potato germplasm resource. *Amer. Potato J.* 66: 655-667.
- Harborne, J.B. (1960) Plant polyphenols. 1 Anthocyanin production in the cultivated potato. *Biochem. J.* 74: 262–269.
- Hawkes, J.G. (1990) The potato - evolution, biodiversity and genetic resources. Belhaven Press, London, UK.
- Hayashi, K., N. Ohara and A. Tsukui (1996) Stability of anthocyanins in various vegetables and fruits. *Food Sci. Technol. Int.* 2: 30-33.
- 林一也・高松直・津久井亜紀夫・岡田亨・森元幸・梅村芳樹 (1997a) アントシアニン色素を含有するニュータイプの馬鈴薯について. *精糖技術研究会誌* 45: 61-69.
- 林一也・鈴木敦子・津久井亜紀夫・高松直・内藤功一・岡田亨・森元幸・梅村芳樹 (1997b) 新品種カラーポテトのアントシアニン、ビタミン C、食物繊維、スクロースについて. *日本家政学会誌* 48: 589-596.
- Hayashi, K., M. Mori, Y. Knox-Matutani, T. Suzutani, M. Ogasawara, I. Yoshida, K. Hosokawa and A. Tsukui (2003) Anti-influenza virus activity of a red fleshed potato. *Food Sci. Technol. Res.* 9: 242-244.
- Hayashi, K., H. Hibasami, T. Murakami, N. Terahara, M. Mori and A. Tsukui (2006) Induction of apoptosis in cultured human stomach cancer cells by potato anthocyanins and its inhibitory effects on growth of stomach cancer in mice. *Food Sci. Technol. Res.* 12: 22-26.
- 林孝三 (1991) 植物色素. 養賢堂出版.
- Hosaka, K. (1993) Similar introduction and incorporation of potato chloroplast DNA in Japan and Europe. *Jpn. J. Genet.* 68: 55-61.
- Hosaka, K. (2004) Evolutionary pathway of T-type chloroplast DNA in potato. *Amer. J. Potato Res.* 81: 153-158.
- Hosaka, K. and R.E. Hanneman, Jr. (1988) The origin of the cultivated tetraploid

- potato based on chloroplast DNA. *Theor. Appl. Genet.* 76: 172-176.
- Hosaka, K., M. Matsubayashi and O. Kamijima (1985) Peroxidase isozymes in various tissues for discrimination of two tuberous *Solanum* species. *Japan. J. Breed.* 35: 375-382.
- 星川清親 (1998) 改訂増補栽培植物の起源と伝播. 二宮書店, 東京.
- Howard, H.W., H. Kukimura and E.T. Whitmore (1970) The anthocyanin pigments of the tubers and sprouts of *Tuberosum* potatoes. *Potato Res.* 13: 142-145.
- Hu, J. and C.F. Quiros (1991) Identification of broccoli and cauliflower cultivars with RAPD markers. *Plant Cell Rep.* 10: 505-511.
- Huamán, Z. (1983) The breeding potential of native Andean cultivars. In: *Research for the potato in the year 2000* (edited by W.J. Hooker). *Proceedings of the tenth anniversary of the International Potato Center, Lima, Peru, Feb. 22-27, 1983.* CIP, Lima, Peru. pp. 96-97.
- 稲垣春郎 (1980) ジャガイモシストセンチュウの防除に関する研究. 研究成果 (農林水産技術会議事務局) 127: 106-110.
- 稲垣春郎 (1984) ジャガイモシストセンチュウの生態並びに防除に関する研究. *北海道農試研報* 139: 73-144.
- 入倉幸雄 (1968) ばれいしょ種間交雑に関する研究. I 倍数体および半数体利用による異種ばれいしょと普通ばれいしょとの交雑不和合性の克服. *北海道農業試験場集報* 92: 21-37.
- 石井現相・森元幸・梅村芳樹 (1996a) 赤紫肉色ジャガイモのアントシアニンの抗酸化活性と食品化学的特性. *日本食品化学工学会誌* 43: 962-966.
- 石井現相・森元幸・梅村芳樹・瀧川重信・田原哲士 (1996b) 赤紫肉色ジャガイモ塊茎のアントシアニンとその含量. *日本食品科学工学会誌* 43: 887-895.
- Ishii, G., M. Mori, A. Ohara and Y. Umemura (1999) Food chemical properties of a new potato with orange flesh. In: *Agri-food Quality II.* The Royal Society of Chemistry, UK. pp. 357-359.
- Ispizúa, V.N., I.R. Guma, S. Feingold and A.M. Clausen (2007) Genetic diversity of potato landraces from northwestern Argentina assessed with simple sequence repeats (SSRs). *Genet. Resour. Crop Evol.* 54: 1833-1848.
- Joshi, C.P. and H. Nguyen (1993) Application of the random amplified polymorphic DNA technique for the detection of polymorphism among wild and cultivated tetraploid wheats. *Genome* 36: 602-609.

- Kim, J.H., H. Joung, H.Y. Kim and Y.P. Lim (1998) Estimation of genetic variation and relationship in potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars using AFLP markers. *Amer. J. Potato Res.* 75: 107-112.
- Koller, B., J.M. Lehmann, J.M. McDermott and C. Gessler (1993) Identification of apple cultivars using RAPD markers. *Theor. Appl. Genet.* 85: 901-904.
- 熊谷亨 (2000) 九州農業試験場におけるサツマイモ育種の最近の青果. 育種学研究 2: 97-104.
- Kresovich, S., J.G.K. Williams, J.R. McFerson, E.J. Routman and B.A. Schaal (1992) Characterization of genetic identities and relationships of *Brassica oleracea* L. via a random amplified polymorphic DNA assay. *Theor. Appl. Genet.* 85: 190-196.
- 串田篤彦・百田洋二 (2005) ジャガイモシストセンチュウ国内地域個体群の H1 抵抗性品種での増殖性. *日本線虫学会誌* 35: 87-90.
- Laufer, B. (1938) The American plant migration. Part 1: The potato. The potato in Japan and Korea. *Anthropological Series, Field Museum of Natural History* 28: 80-83.
- Lewis, C.E., J.R.L. Walker, J.E. Lancaster and K.H. Sutton (1998) Determination of anthocyanins, flavonoids and phenolic acids in potatoes. I: Coloured cultivars of *Solanum tuberosum* L. *J. Sci. Food Agric.* 77: 45-57.
- Love, S.L. (1999) Founding clones, major contributing ancestors, and exotic progenitors of prominent North American potato cultivars. *Amer. J. Potato Res.* 76: 263-272.
- Matsuura-Endo, C., A. Ohara-Takada, H. Yamauchi, Y. Mukasa, M. Mori and K. Ishibashi (2002) Disintegration differences in cooked potatoes from three Japanese cultivars: comparison of the properties of isolated starch, degree of cell separation with EDTA, and contents of calcium and galacturonic acid *Food Sci. Technol. Res.* 8: 323-327.
- Matsuura-Endo, C., A. Kobayashi, T. Noda, S. Takigawa, H. Yamauchi and M. Mori (2004) Changes in sugar content and activity of vacuolar acid invertase during low-temperature storage of potato tubers from six Japanese cultivars. *J. Plant Res.* 117: 131-137.
- McGregor, C.E., C.A. Lambert, M.N. Greyling, J.H. Louw and L. Warnich (2000) A comparative assessment of DNA finger-printing techniques (RAPD, ISSR, AFLP and SSR) in tetraploid potato (*Solanum tuberosum* L.) germplasm.

- Euphytica 113:135-144.
- Mendoza, H.A. and F.L. Haynes (1974) Genetic relationship among potato cultivars in the United States. HortScience 9: 328-330.
- Mori, M. (2001) Breeding of potato varieties to meet changing demand. Farming Japan 35: 10-15.
- 森元幸 (2003) カラフルポテトの品種育成による消費活性化を目指して. Techno Innovation 50: 27-30.
- 森元幸 (2009) 日本におけるジャガイモシストセンチュウ抵抗性品種の育成. 北農 76: 7-13.
- 森元幸・西部幸男 (1987) ばれいしょ「R392-50」. 北海道農業試験場研究資料 33: 102-106.
- Mori, M., S. Tsuda, N. Mukojima, A. Kobayashi, C. Matsuura-Endo, A. Ohara-Takada and I.S.M. Zaidul (2007) Breeding of potato cyst nematode resistant varieties in Japan. In: Potato production and innovative technologies (edited by A.J. Haverkort and B.V. Anisimov). Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. pp. 328-339.
- 永田利男・高瀬昇 (1967) ばれいしょ. 北海道農業技術研究誌 pp. 223-243.
- Naito, K., Y. Umemura, M. Mori, T. Sumida, T. Okada, N. Takamatsu, Y. Okawa, K. Hayashi, N. Saito and T. Honda (1998) Acylated pelargonidin glycosides from a red potato. Phytochemistry 47: 109-112.
- 西部幸男・稲垣春郎 (1980) ジャガイモシストセンチュウ抵抗性品種の探索と利用, ジャガイモシストセンチュウの防除に関する研究 (研究成果). 農林水産技術会議 127: 102-114.
- 西川研次郎 (2008) 食品機能性の科学. 産業技術サービスセンター.
- 岡村正愛・百瀬眞幸・加藤忠 (1991) プロトプラスト育種による馬鈴薯新品種「ジャガキッズパープル '90」「ジャガキッズレッド' 90」の育成. 育種学雑誌 41 (別 1) : 104.
- Oliver, J.L. and J.M. Martínez-Zapater (1985) A genetic classification of potato cultivars based on allozyme patterns. Theor. Appl. Genet. 69: 305-311.
- Plaisted, R.L. and R.W. Hoopes (1989) The past record and future prospects for the use of exotic potato germplasm. Amer. Potato J. 66: 603-627.
- Plaisted, R.L., H.D. Thurston, L.C. Peterson, D.H. Fricke, R.C. Cetas, M.B. Harrison, J.B. Sieczka and E.D. Jones (1973) Hudson: a high yielding variety

- resistant to golden nematode. Amer. Potato J. 50: 212-222.
- Provan, J., W. Powell and R. Waugh (1996) Microsatellite analysis of relationships within cultivated potato (*Solanum tuberosum*). Theor. Appl. Genet. 92: 1078-1084.
- Rafalski, J.A., S.V. Tingey and J.G.K. Williams (1991) RAPD markers - a new technology for genetic mapping and plant breeding. AgBiotech. News Info. 3: 645-648.
- Ross, H. (1986) Potato Breeding - problems and perspectives. Verlag Paul Parey, Berlin and Hamburg.
- Simko, I., K.G. Haynes and R.W. Jones (2004) Mining data from potato pedigrees: tracking the origin of susceptibility and resistance to *Verticillium dahliae* in North American cultivars through molecular marker analysis. Theor. Appl. Genet. 108: 225-230.
- Stegemann, H. and V. Loeschcke (1976) Index Europäischer Kartoffelsorten/Index of European Potato Varieties (bilingual), based on electrophoretic spectra. Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- u. Forstwirtschaft 168: 1-215.
- Stegemann, H., H. Francksen and V. Macko (1973) Potato proteins: Genetic and physiological changes, evaluated by one- and two-dimensional PAA-gel-techniques. Zeitschrift für Naturforschung 28b: 722-732.
- Stiles, J.I., C. Lemme, S. Sondur, M.B. Morshidi and R. Manshardt (1993) Using randomly amplified polymorphic DNA for evaluating genetic relationships among papaya cultivars. Theor. Appl. Genet. 85: 697-701.
- 末木一夫 (2005) 食品機能素材Ⅲ. シーエムシー出版. pp. 86-89.
- Sukhotu, T. and K. Hosaka (2006) Origin and evolution of Andean potatoes revealed by chloroplast and nuclear DNA markers. Genome 49: 636-647.
- 田口啓作 (1961) 異種馬鈴薯の育種的利用. 育種学最近の進歩 2: 32-43.
- 高宮和彦・大澤俊彦 (2004) 色からみた食品のサイエンス. サイエンスフォーラム.
- 高瀬昇 (1968) ばれいしょの疫病抵抗性に関する育種学的ならびに病理学的研究. 北海道農業試験場研究報告 71: 1-118.
- Tinker, N.A., M.G. Fortin and D.E. Mather (1993) Random amplified polymorphic DNA and pedigree relationships in spring barley. Theor. Appl. Genet. 85: 876-984.

- 富田良美・川上幸治郎（1989） バレイショの種間雑種. ポテトサイエンス
9: 71-78.
- 津久井亜紀夫・鈴木敦子・小巻克己・寺原典彦・山川理・林一也（1999） さ
つまいもアントシアニン色素の組成比と安定性. 日本食品科学工学会
誌 46: 148-154.
- 梅村芳樹（1984） ジャガイモ—その人とのかかわり—. 古今書院.
- Vierling, R.A. and H.T. Nguyen（1992） Use of RAPD markers to determine the
genetic diversity of diploid, wheat genotypes. Theor. Appl. Genet. 84: 835-
838.
- Ward, J.H.（1963） Hierarchical grouping to optimize an objective function. J.
Am. Statist. Ass. 58: 234-244.
- Wilde, J., R. Waugh and W. Powell（1992） Genetic fingerprinting of *Theobroma*
clones using randomly amplified polymorphic DNA markers. Theor. Appl.
Genet. 83: 871-877.
- Wilkie, S.E., P.G. Isaac and R.J. Slater（1993） Random amplified polymorphic
DNA (RAPD) markers for genetic analysis in *Allium*. Theor. Appl. Genet.
86:497-504.
- Williams, C.E. and D.A. St Clair（1993） Phenetic relationships and levels of
variability detected by restriction fragment length polymorphism and random
amplified polymorphic DNA analysis of cultivated and wild accessions of
Lycopersicon esculentum. Genome 36: 619-630.
- Williams, J.G.K., A.R. Kubelik, K.J. Livak, J.A. Rafalski and S.V. Tingey（1990）
DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic
markers. Nucleic Acids Res. 18: 6531-6535.
- 山川理（1999） 高色素サツマイモの育種と利用. 農業及び園芸 74: 851-856.
- 山本紀夫（2004） ジャガイモとインカ帝国. 東京大学出版会.
- Yang, X. and C. Quiros（1993） Identification and classification of celery cultivars
with RAPD markers. Theor. Appl. Genet. 86: 205-212.