

PCN抵抗性品種の開発・普及状況について

～シロシストセンチュウ発生10年の状況～

農研機構北海道農業研究センター あかいこうたろう
赤井浩太郎

1. はじめに

ジャガイモシロシストセンチュウ類 (Potato Cyst Nematodes, PCN) は、ばれいしょを含むナス科植物に寄生し、生育不良や収量減を引き起こす重要害虫である。加えて、PCNの発生が確認されたことがある圃場で生産されたばれいしょは、植物防疫法の規定により種イモとしての移動や譲渡ができないため、PCNの蔓延は種イモの生産流通を阻害し、ひいてはばれいしょ生産全体の存続に関わる重要な脅威である。

PCNのうち、ジャガイモシロシストセンチュウ (*Globodera rostchiensis*, Gr) は、1972年に北海道で初確認され、以来抵抗性遺伝子HIを用いた抵抗性育種が進められている。ジャガイモシロシストセンチュウ (*Globodera pallida*, Gp) は、2015年に初確認されて以来、植物防疫法に基づく緊急防除が展開されるとともに、複数のGp抵抗性遺伝子を利用した抵抗性育種が開始された。今回、Gp発生確認から10年が経過し、Gp抵抗性品種の開発および普及が進んできたことから、これらの現状についてまとめ、報告する。

2. Gp緊急防除後の考え方

Gpの発生が確認されてから、発生確認圃場では植部防疫法に基づくGpの緊急防

除が開始された。緊急防除の内容については本稿では割愛するが、Gpの宿主となるナス科植物 (ばれいしょ、トマトなど) の栽培が禁じられるなどの措置が取られた。緊急防除は全体として極めて順調に推移し、Gpが減少し土壤中に検出されなくなった (= 検出限界以下) 圃場が増えており、そのような圃場では緊急防除の対象地域から除外され、ナス科植物の栽培が解禁されている。しかしながら、Gpが検出限界以下であるということは、広い圃場の土壤中にGpが全く存在しないことを意味するわけではなく、Gpが増えやすいばれいしょ品種を栽培した際に再度Gpが増殖してしまうリスクがある。このため、農林水産省は消費・安全局長通知令和2年4月23日付け2消安第401号に示すジャガイモシロシストセンチュウ再発防止対策指導要領のなかで、「検出限界以下ほ場において、ナス科植物の栽培を行う場合は、Gpに対して相当の抵抗性を有していると認められる品種を選択するとともに、ナス科植物以外の植物を組み合わせる3年以上の輪作体系を組み、ナス科植物の連作を行わないようにすること。」を求めている。「相当の」というのは判断が難しい線引ではあるものの、実質的には後述する「フリー」と同程度以上のGp抵抗性を持つ品種が選択されるべき

である。各ばれいしょ育成場はこれに適するGp抵抗性品種の育成に取り組んでいる。

3. Gr抵抗性育種とGp抵抗性育種の違い

Gr抵抗性育種は、主にHI遺伝子を基幹として展開される。HI遺伝子は日本国内で発生しているGr集団に対して非常に強い効果を持ち、ほぼ完全にGrのシスト形成を阻害する。日本国内のGr抵抗性育種は、北海道でのGr発生確認後の1970年代から開始された。当時、国内にはHIを有する流通品種がなかったことから、海外導入品種である「ツニカ」「Wauseon」「Hudson」といった品種をHIドナーとして、国産のGr抵抗性品種が複数開発された(図1)。

Grには抵抗性遺伝子HIが有効



HI遺伝子:Grが孵化し、寄生するが、生育を継続できなくなる

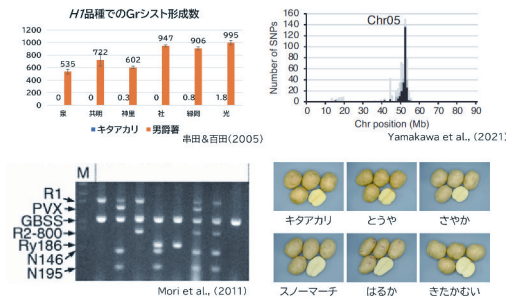


図1

一方で、Gp抵抗性育種においては、Grに対するHI遺伝子のように強い効果を持つ抵抗性遺伝子はなく、中程度の効果を持つ抵抗性遺伝子を複数導入する(Pyramiding)ことで、実用的な抵抗性を発揮させる必要がある。国内外の抵抗性育種では、基本的に*Solanum verrnei*由来のGpa5遺伝子、Gpa6遺伝子と*S. tuberosum* spp *Andigena*由来のGpaIV^{adg}遺伝子の3

つを使うことが一般的であり、このうちGpa5遺伝子が最も強い効果を持つことが知られている。これらのメジャーな抵抗性遺伝子に加え、それぞれの品種が持つ遺伝的なバックグラウンドによって抵抗性強度は一定程度変動するようであり、遺伝子型から抵抗性程度を正確に予測することは難しい。このため、Gr抵抗性は“有”または“無”の二元的に評価することが可能であるが、Gp抵抗性はスコア1~9の9段階評価または“弱”~“強”の5段階評価によって抵抗性強度を表す(図2)。この抵抗性評価法は農研機構標準作業手順書「バレイシヨのジャガイモシロシストセンチュウ抵抗性検定マニュアル」(2020)に詳細が記述されているので、興味のある方は一読されたい。

Gp抵抗性はGr抵抗性ほど単純ではない



抵抗性スコアの評価方法

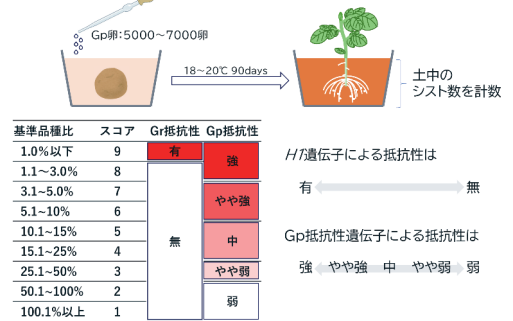


図2

4. Gp抵抗性品種の開発戦略

Gp発生確認当時、Gpに対して抵抗性を有する実用的な品種は国内になく、過去にGp抵抗性を有する品種が導入された例もあったが、いずれも普及に至らなかった。そのため緊急防除終了後の栽培に適するGp抵抗性品種の開発・普及が早急に求め

られる状況にあった。農研機構北海道農業研究センターでは、2012年頃からGpの国内侵入を懸念し、Gp抵抗性プログラムを開始していた。しかし一般に、ばれいしょ品種の育成には11~12年、さらに種ばれいしょの増殖に3年かかることから、緊急防除終了時に育成品種の普及は間に合わず、当面の間は海外からの導入品種の普及によって対応することが考えられた。

フランスのジェルミコパ社が開発した「フリア (G05SC266.006)」は、そのような目的で選抜された品種である。「フリア」はGp発生確認前より日本国内での普及を目指して導入されており、タイミングとして非常に適していた。ややイモが小粒ででん粉価が低いことが懸念されたものの、“やや強”のGp抵抗性を有し、栽培法によっては当時のでん粉原料用主力品種である「コナフブキ」と同等のでん粉収量が得られると判断されたことから、Gp発生地域への普及が開始された。“やや強”のGp抵抗性は、Gpのシスト着生を完全に抑えることはできないものの、Gpの卵密度では栽培前密度からほとんど増やさない程度の強度を示す。しかしながら、生産現場においては、でん粉価が上がらない点やイモが小さく茎葉から外れにくい点が生産上大きな問題であると指摘され、さらに栽培しやすく多収のGp抵抗性品種が求められる状況にある。ドイツのユーロプラント社が開発した「ユーロビバ」は、「フリア」と同様の導入品種であるが、より強いGp抵抗性を示し、塊茎が大きいことから、今後の導入が検討されている段階である。

国産のGp抵抗性品種開発では、上記のような導入品種(本稿では第0世代と呼ぶ)

を抵抗性遺伝子ドナーとし、国産品種を交配することによって、北海道での栽培に適する品種の開発が進められてきた(第1世代品種)(図3)。第1世代品種の中では、「Eden」×「十勝こがね」から「きたすずか」が、「フリア」×「サクラフブキ」から「きよみのり」がそれぞれ育成され、現在普及を待っている段階である。一方で、第1世代の育成系統では、晩生化、小粒化、低比重化、内部障害の多発などが顕著に発生しやすく、Gr抵抗性育種にくらべて品種登録出願に至るものが少ない傾向にある。

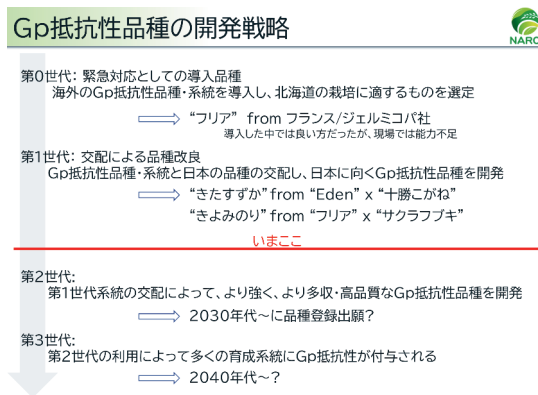


図3

現在は、これら国産第1世代品種・系統を親とし、優れた収量や品質とGp抵抗性を両立できる第2世代品種の開発が始まっている。品種登録出願までまだ時間が必要であるものの、第1世代が有する欠点を解消しつつ、これまでの基幹品種に近い特性を示す品種が育成されることが期待される。将来的には、この第2世代品種系統を親にした第3世代品種の開発によって、さまざまな用途、栽培体型にフィットするGp抵抗性ラインナップを揃えることが理想と考えている。

5. Gp 抵抗性育種はなぜ効率が悪いのか

Gp 抵抗性育種が本格化してから10年余りが経過し、各ばれいしょ育成場でも一定の経験値とノウハウが蓄積されてきたところであるが、意見が一致するところとしては、Gp 抵抗性を意図した交配組み合わせからは、品種にできるものの出現率が低い、ということである（図4）。これには主に3つの要因がある。

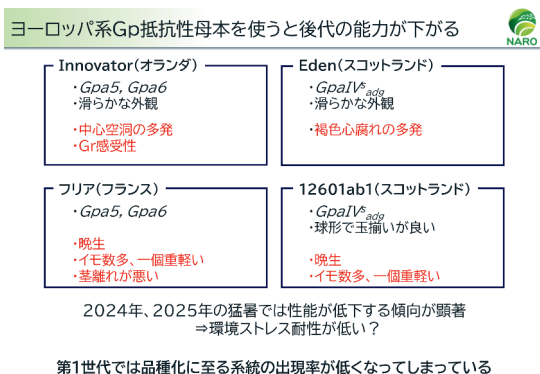


図4

1つ目は、複数のGp 抵抗性遺伝子を集積しなければいけない点である。たとえば、HIを一個持つ親とHI遺伝子を持たない親を交配した際、その後代のGr 抵抗性個体の出現率は約50%である。しかし、スコア9相当の強いGp 抵抗性を狙って、Gp 抵抗性遺伝子を3つ集積することを狙うと、それぞれについて約50%の遺伝率となり、最終的には展開した個体のうち約12.5%しか、狙った遺伝子型が得られないと予測される。また、重要なGp 抵抗性遺伝子ドナーである「Innovator」はHIを持たないことから、もう一方の親からHIを導入する際にさらに半分に減ってしまい、最終的には約7%の出現率にまで減ってしまう。このように限られた集団の中では、収量性や品

質特性の選抜を十分に行うための展開数を確保することが難しく、Gr 抵抗性育種に比べると大幅に効率が悪くなってしまふ。

2つ目は、Gp 抵抗性ドナーであるヨーロッパ系品種を親に使うと、後代で明らかに品質特性が劣るという点である。国内のGp 抵抗性育種で用いられているドナー品種・系統としては、「Innovator（オランダ/HZPC社）」、「Eden（スコットランド/SCRI）」、「12601ab1（スコットランド/SCRI）」、「フリア（フランス/Germicopa社）」、「Rocket（イングランド/Plant Breeding Institute）」などが使われているが、いずれもヨーロッパ系品種である。いずれの育成地も北海道よりも緯度が高い一方で、西岸海洋性気候に属する地域であることから、北海道に比べて夏が涼しく、冬は暖かく、一年を通じて降水量が安定するのが特徴で、ばれいしょ栽培に非常に適した気候である。また、緯度が高いことから夏季の日長が長く、秋は日長変化の落差が大きい。また作型も、オランダでは食用品種は2月から3月にかけて植え付け、6～7月に収穫、でん粉原料用は5～6月頃に植え付けて10月から11月に収穫するような体系となっており、早生種はより強い長日環境で塊茎形成する⇒北海道では早生化する、晩生種はより強い短日条件で成熟する⇒北海道では晩生化する、などの関係が見られる。このように気候や栽培体系が全く異なる品種を交配親に使うと、その後代も北海道の環境に適応していない個体の出現率が高くなり、晩生化、小粒化、低でん粉価化、内部障害の多発などの特性が生じうる。このため、ヨーロッパ系Gp 抵抗性ドナー品種の直接の後代は、品種化できる個

体の割合が低くなるようだ。

最後に、Gp抵抗性遺伝子そのものが、野生種に由来するものであるという点である。一般的に野生種は非常に幅広い遺伝的多様性を有するものの、人類が品種として産業利用するには適さない劣悪な特性を司る遺伝子も多く含んでいる。Gp抵抗性遺伝子を交配育種によって導入する際には、他の関係ない野生種由来遺伝子が一定数導入されることとなってしまう、その中には劣悪形質を発現させるものも含まれていると考えられる。特に、ターゲットであるGp抵抗性遺伝子のすぐ近くに座乗しているような遺伝子は、連鎖引きずり（Linkage Drag）と呼ばれる現象によってGp抵抗性とセットで導入されることとなり（たとえばInnovatorのGpa5遺伝子と、葉が強く波打つ特性はセットで動く）、品種改良されたドナー品種にも劣悪な特性が残っている場合がある。このように、Gp抵抗性遺伝子を利用するうえで避けて通れない劣悪な特性についても、Gp抵抗性品種の能力向上を妨げる方向に働く。

以上のように、Gp抵抗性品種の育成は難易度が高いことが明らかになり、当初考えられていたよりも多くの世代、時間が必要であることがはっきりしてきた。

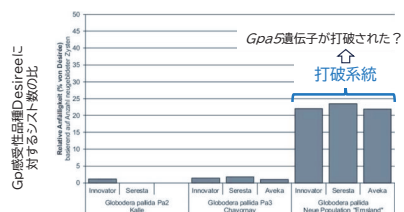
6. Gp抵抗性は安定的か？

バレイショのGp抵抗性に限らず、植物が持つ病虫害への抵抗性は、往々にして打破されることがある。抵抗性のメカニズムや植物と病原菌の間の相互作用によって条件が異なるものの、一般には単一の抵抗性を持つ品種群を広く栽培すると打破が起きやすいとされる。この関係は農薬に対して

抵抗性を獲得する害虫や病原菌の関係と似ている。Gpの場合、抵抗性遺伝子は主に3種あるが、単独で強い効果を発揮するのはGpa5遺伝子のみである。Gpa5遺伝子を持った品種の抵抗性を回避する（抵抗性強度が下がる）Gp個体群が出現しうるのは実験的に確かめられており、ドイツでは実圃場においてもそのようなGp個体群が発生した事例が報告されている。現状、このような個体群が世界的に蔓延しているという情報はないことから、このような打破個体群の出現はかなり珍しい事例であると推定されるが、北海道においてもGp抵抗性品種を広く栽培した場合に、そのような事例が生じる可能性を無視することはできない。

他方、品種以外の方法でGpを抑える技術開発も進められており、殺線虫剤の活用やGp捕獲植物の輪作体系への採用といった、抵抗性品種だけに頼らないGp対策技術が確立しつつある。武器の少ないGp抵抗性を維持していくためには、あえて品種の力だけにたよらない総合的な害虫管理（IPM）の導入が推進されるべきである（図5）。

Gp抵抗性は打破されてしまうかもしれない



Gpに対して強い抵抗性を持つInnovatorでもシストが多数着生している感受性品種比で20%以上のシスト着生数⇒スコア4(“抵抗性中”)以下
 Auftreten einer außergewöhnlich virulenten Population der Kartoffelzylindermotoden
 Journal für Kulturpflanzen, 66 (12), S. 426-430, 2014, ISSN 1867-0911, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart

- ・ドイツではフリアと同じタイプの抵抗性が打破された例がある(2014年)
- ・単一の抵抗性起源をもつ品種を広く栽培すると打破リスクが高まる
- ・Gp抵抗性は打破されたときに替えが無い

⇒ 品種の抵抗性 + 輪作の中での自然減 + 捕獲作物 + 殺線虫剤
 総合的害虫管理(IPM)によるリスクコントロールが重要

図5

7. おわりに

Gp発生確認から10年が経過し、関係機関の協力の下Gpの緊急防除は奏功してきた。これからの10年間は、Gpの再発生リスクや新規発生リスク、抵抗性打破リスクがゼロにはできないことを念頭に置きながら、ばれいしょ生産を最大化していく努力

が必要となる。また、PCNは種ばれいしょ生産圃場に大きな影響を与えることから、持続的なばれいしょ産業の維持にはPCNの蔓延防止策は必須である。前回のGrの蔓延を食い止めることができなかった反省を活かし、Gpはしっかりと抑え込んでいかなければならない。

ジャガイモ事典

編集・発行：財団法人いも類振興会
B5判、416頁、定価4,800円+税

刊行の目的

これまで、ジャガイモの生産から消費、文化に至る全体を解説した書物はなかった。このため、起源、伝播、作物特性、品種、栽培、加工、料理、文化に関する事項・用語解説を内容とするジャガイモ事典を刊行することとした。

刊行の目的は、ジャガイモの振興を図るため、生産者、流通・加工業者、研究・指導者にジャガイモに対する関心と理解を一層深めていただくほか、学生、消費者にとっても、ジャガイモの全てが解る入門書としての役割を期待した。



事典の構成

本事典は、ジャガイモに関する総合事典である。収録した主要な事項・用語数は610。執筆者はジャガイモの専門家69名。事典の構成は7章33節から成る。

口絵 カラー写真12頁（品種、料理、栽培、病害虫・生理障害）

- I章 ジャガイモの起源と伝播
- II章 ジャガイモの特性
- III章 ジャガイモの生産と普及
- IV章 ジャガイモの流通・加工・消費
- V章 ジャガイモの食べ方
- VI章 ジャガイモをめぐる文化
- VII章 世界のジャガイモ事情

◎購入申込み先◎ 一般財団法人いも類振興会（巻末参照）