

## 国立大学法人 大阪大学 大学院 工学研究科 生物工学専攻 村中研究室 編

# 代謝を制御して新しい価値を生む ~ジャガイモの天然毒素低減研究~

2021年9月に、ゲノム編集によって開発された、血圧の上昇を抑える作用があるGABAを多く含むトマトが一般に流通し始めてから1年以上が経ちました。可食部が多いマダイと、成長が早いトラフグの販売も始まりました。いずれも、ゲノム編集技術による"これまでよりプラス・アルファ"な特性が売りですが、今回取り上げるのは、ジャガイモが元々持つ天然毒素を作れないようにする"マイナス要素をゼロ"にする研究です。この取組は新しい価値を生み出せるのでしょうか?天然毒素低減ジャガイモを作ることに成功した、大阪大学大学院工学研究科の村中俊哉教授、安本周平助教を取材しました。

# 本記事のポイント

- ジャガイモには、芽や皮の下で毒素(ソラニン等)を作るという難点があるが、その代謝経路が 分かってきた
- 花ジャガイモの多くの品種は、ゲノムが「四倍体」で遺伝パターンが複雑な上、交配で次世代を 作りにくい性質があるため、交配での品種改良は困難を極める
- そこで、毒素を作る代謝経路に関わる遺伝子をゲノム編集によって働かないようにすることに より、毒素低減ジャガイモを作ることに成功した



# ジャガイモをもっと安全で 利用しやすくするために

読者の皆さんは、学校の調理実習でカレーライスを作りませんでしたか? 筆者は小学校で、ニンジン、ジャガイモ、タマネギ、そして肉を材料にした、ザ・定番とも言えるレシピを習いました。その際、「ニンジンは薄く、ジャガイモは厚く、皮を剥くように」と教わりました。ジャガイモは芽や皮のすぐ下の部分に毒素があり、調理で加熱しても壊れないため厚く剥く必要があります。

2022年7月に、長野県の小学校で発生した茹でたジャガイモによる食中毒が報道されましたが、これは氷山の一角で、ニュースにはなりませんが、ご家庭やキャンプでジャガイモを食べて腹痛を起こしたり、味がえぐくて食べなかったりという話を、皆さん一度は耳にしたことがあるのではないでしょうか。この毒素は、農林水産省が「ジャガイモによる食中毒を予防するためにできること」という資料を公開して呼びかけているほど、注意が必要なものです(※1)。

元々、**芽や皮の下に多いジャガイモの毒素は、光**が当たったり、傷が付いたりすると増えてしまいま
す。そのため、芽をしっかり取り除いて皮も厚めに
剥けば食中毒の心配はなくなりますが、それは大き
なフードロスにつながります。緑色がかった部分が
無くなるまで剥けばよいとも言われますが、実は光
が当たって緑色になることと毒素ができることは、
独立の現象だそうです。つまり極端な話、毒素ができないジャガイモなら緑色のポテトサラダも作れる
そうです。緑色になることは光を浴びたことの目安でしかないとすれば、いったいどこまで剥けばよいのか、不安になる方もいるかもしれません。

ジャガイモは、炭水化物やタンパク質の含量は穀類に多少劣るものの、穀類にはないビタミンCや食物繊維を多く含むこと(※2)、単位面積当たりの収量が多いこと(※3)から、主食としている国もあるほど重要な農産物です。毒素がなければ、安全で保存や輸送が楽な、今以上に利用しやすい食材になるはずです。

## メタボロミクス研究の進展

生体内で起こる生合成や化学変化、それにともなうエネルギー変換のことを代謝と言います。この代謝でできた物質を解析し、ゲノム機能と対応させることをメタボロミクス研究と呼びます。

「植物の代謝物質は、植物全体では100万種類とも200万種類とも言われています。それを全部扱うのはさすがに無理があります。そこでテルペノイドという物質の仲間、中でもトリテルペノイドの代謝経路がわたしたちの研究室のテーマなんです。」と村中教授は話します。しかし、テルペノイドだけでも6万種類ほどが知られています。ヒトの代謝物質は3,000種類ほどということを考えると、植物の代謝物質の多様性が桁違いであることがわかります。当然、メタボロミクス研究も桁違いに大変でしょう。

「でも、研究対象がトリテルペノイドの仲間に特化していることで、いろいろな情報が蓄積され、遺伝子群についても理解が進みました。」と村中教授は続けます。ステロイドや、ソラニン・チャコニンといったステロイドグルコアルカロイド(SGA)と呼ばれるジャガイモの毒素もトリテルペノイドの一種なので、研究室の"守備範囲"だそうです。そして、SGAをはじめとするトリテルペノイドの生合成に関わる酵素の遺伝子群にまで理解が進んだことで、代謝制御に遺伝子レベルで取り組めるようになったと言います。



村中俊哉教授(左手奥)にお話を伺いました。



# 毒素を作る代謝の流れを止める ことに成功

それでは、今回の解説の本題であるゲノム編集の 話に入りましょう。

ジャガイモ特有の毒素を作る代謝経路のどこかを 止めれば、毒素を減らせる、あるいは無くせるはず です。村中教授たちは、ソラニンが作られる代謝経 路を調べ、コレステロールの生合成と毒素を作る代 謝経路がつながっていることを明らかにしました (※4)。そして、コレステロールの生合成に関わ るSSR2という酵素を作る遺伝子をゲノム編集に よって働かないようにし、酵素が作られないように **しました**。図1に描かれているのは、毒素ができるまでの代謝経路です。

まず、デスモステロールという物質からSSR2 (図1赤枠)によってコレステロールが作られます。そこから青い矢印に従って右に進むと、天然毒素のソラニンとチャコニン(図1青枠)に行き着きます。途中に出てくるPGA1、PGA2、16DOXは酵素の略称です。ソラニンやチャコニンができるまでにはいくつもの化学反応が必要で、反応ごとに特有の酵素が関わっているということは覚えておいてください。

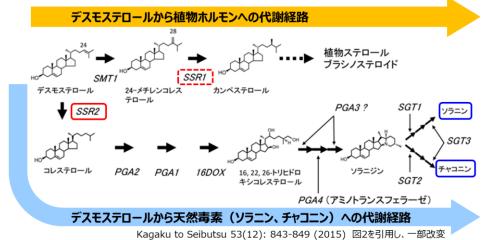


図1:ソラニン及びチャコニンの生合成経路

四:・フラーンスしァ、コーンのエロスが、

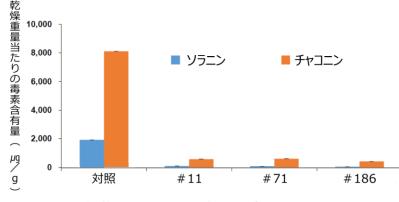
ポテトに向いているサッシーという品種でした。 SSR2遺伝子が完全に働かなくなっていることが確 認できた個体(#11, #71, #186)では、図2のグラ フのように、作られる毒素の量が劇的に減っている ことが分かります。なお、イモの収量が減るような ことはありませんでした(※5)。

ゲノム編集したのは、ポテトチップスやフライド

毒素の量が完全にゼロになっていないのは、後述

のSSR1と言う遺伝子が、SSR2遺伝子と同じよう にコレステロールを作る働きを少し行うためだと考 えられています。

そこで現在は、コレステロールから先の反応に関わる16DOXなどのゲノム編集に取り組み始めているそうです。また、毒素が減るだけでなく保存中に芽が伸びてこないという、うれしいおまけの結果も出ているようです。



品種はサッシーを使用 「対照」はゲノム編集をしていない個体 その他は、#番号を個体ごとに付けている。 対照に比べて、どの個体もソラニン及び チャコニンの含有量が減少している。

図2:ゲノム編集によってSSR2遺伝子が完全に働かなくなったジャガイモの ソラニン及びチャコニンの生合成量



実は、ゲノム編集を試みる前に、RNA干渉 (RNAi) という方法 (%6) でSSR2遺伝子の働きを抑える実験をしています (RNAiについては巻末参考1を参照)。

SSR2遺伝子と塩基配列がよく似たSSR1(図1赤破線枠)という酵素を作る遺伝子があります。 SSR1遺伝子が働くと、図1の上側にあるコレステロールから植物ホルモンをつくる代謝経路に進みます。RNAiでの実験では、このSSR1遺伝子の発現に多少の影響が出てしまいました。

「ゲノム編集の場合は目的遺伝子のみを効率良く、高い精度で働かないようにすることができるんです。間違いが少ないんです。」と村中教授は語ります。 代謝にかかわる酵素の遺伝子を切ると、代謝の流れを止めることができる。しかも、精緻にできるというのがゲノム編集技術のアドバンテージです。

今回成功したSSR2遺伝子のゲノム編集は、TALEN (※7)というゲノム編集ツールを使っています。 ノーベル賞で有名になったCRISPR/Cas9ではない の?と思った方もいるでしょう。これは、TALEN の方が先に開発された技術だったからですが、天然 毒素低減ジャガイモの開発が以前から取り組まれて きたことの証でもあります(TALENとCRISPR/ Cas9の違いについては巻末参考2を参照)。

# 消費者の理解を得るために

ゲノム編集技術は世界的にも新しい技術で、まずは知見を蓄積しつつ、消費者の理解を得ながら進めていくことが重要です。そのため、流通等に先立ち、開発者等は関係省庁に事前相談を行い、食品等の安全性や生物多様性確保の観点から問題がないか、外来の遺伝子が残っていないか、狙った塩基配列以外が編集されてしまう現象(オフターゲット)が起こっていないかといったことに関して、専門家に意見を伺い確認しています。問題がないことが確認できれば、開発者等は関係省庁に届出や情報提供書を提出し、各省庁はこれを受理し公表しています。このように情報をきちんと公開し、消費者の理解を得

ながら進めていくことの重要性を村中教授も感じています。そして、ゲノム編集なら安全ということではなく、ゲノム編集とはそもそもどのような技術なのか、育種とは何か、といった根本的な考え方から丁寧に伝えることを大切にしてきたそうです。



見学会の参加者に天然毒素低減ジャガイモの説明を 行う村中教授

## 「四倍体」という育種の壁

ところで、ゲノム編集技術は、ゲノム中の狙った場所を正確に切断できるというのが大きなメリットとして語られますが、ジャガイモではもう一つ大きなメリットがあります。それは、四倍体であることによる育種の困難さを克服できるということです。「四倍体」って何? 何が"倍"なの?と思った方もいるのではないでしょうか。

例えば、ヒトの体細胞は染色体のセットを二つ、精子や卵の生殖細胞は一つ持っています。一般的に、「その生物は○倍体」と言うときには、体細胞が染色体を何セット持っているかで考えます。ヒトは2セットなので二倍体と言うことになります。ジャガイモはその倍の四倍体で、染色体を4セット持っています。ジャガイモにも、原種など二倍体のものはありますが、食用として重用されている品種のほとんどは四倍体です。メークインも男爵も四倍体です。四倍体になるとバイオマス、つまり食べられる部分が大きくなるため、育種の過程で四倍体が選ばれてきました。



四倍体のジャガイモの育種はなぜ大変かという点については、本文では簡単に説明するに留めたいと思います(詳しくは巻末参考3を参照)。

ある遺伝子を完全に働かないようにしようとする場合、その遺伝子を全て働かなくする必要があります。二倍体の植物であれば2セットの染色体にそれぞれ遺伝子が存在するので、2か所の遺伝子を働かなくさせれば良いわけですが、四倍体の場合はその倍の4か所の遺伝子を働かなくさせる必要があります。染色体のセット数が増えるほど、その組み合わせの数は増えるので、四倍体で交配による育種で行おうとすると、非効率という言葉では片付けられないほど大変になります。しかも、ジャガイモには同じ株の中で受粉すると種ができにくかったり、近親間の交配では子孫に良くない性質が現れやすくなったり、そもそも花粉ができにくいという性質まであります。

しかし、ゲノム編集技術を用いれば、**4か所の遺 伝子を一度に働かなくさせることができます**。

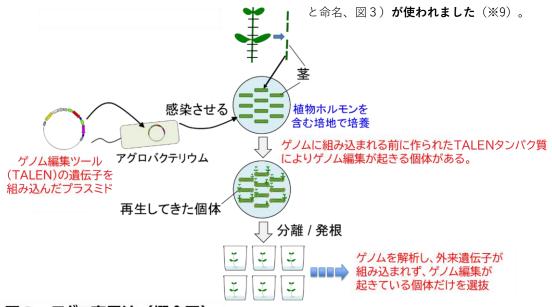
そして、ジャガイモの品種の多くは、種子を採るのが難しい替わりにイモをタネ代わり(種芋)にして増やすことができます。この種芋で増えた個体は互いにクローンです。交配では親子のゲノムは必ず異なるものになってしまい、親が持つ優良な性質が必ずしも受け継がれませんが、種芋で増やす場合は親子のゲノムは全く一緒になり、親が持つ優良な形質をそのまま受け継ぐことができます。

## ジャガイモのゲノム編集 ならではの苦労

ところで、ゲノム編集するにも植物の場合、細胞にある細胞壁が文字通り"壁"となっていることは、無花粉スギの解説(※8)でも書きました。ゲノム編集のための"ツール"を細胞内に送り込むのに、細胞壁が邪魔になります。植物細胞にゲノム編集ツールを直接入れることは難しいため、一般的に植物にゲノム編集を行う場合、ゲノム編集ツールの遺伝子を一度遺伝子組換えによって細胞に導入し、ゲノム編集を行います。その後、ゲノム編集が成功した細胞のみを選抜し培養を行って、そこから個体を再生させることでゲノム編集された個体が手に入ります。

遺伝子組換えには、アグロバクテリウムという細菌の力を借りる手法(アグロバクテリウム法)を用いることが一般的です。アグロバクテリウムは、感染先の植物細胞に遺伝子を送り込むことができる環状のDNA(プラスミド)を持っています。そこにゲノム編集ツールの遺伝子を載せておくと、それによってゲノム編集をした個体ができます。そして後日、ゲノム編集した個体と、ゲノム編集を行う前の個体を交配することによって、ゲノム編集に成功し、かつ、ゲノム編集を行う酵素の遺伝子を持たない個体を得ます。

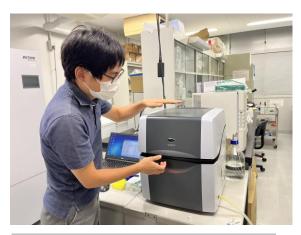
しかし、先ほども出てきたように、ジャガイモでは交配によって親が持つ優良な性質が失われてしまうことが多く、交配を行うこと自体も難しいため、今回はアグロバクテリウム法を基に少し改良を加えた方法(村中教授らのグループで「アグロ変異法」と命名、図3)が使われました(※9)





一般的に、植物のゲノム編集を行う場合は、ゲノ ム編集ツールの遺伝子が一旦、植物のゲノムに組み 込まれることを期待しますが、アグロ変異法では ちょっと違います。アグロバクテリム溶液に茎の切 片を浸すことで、茎の細胞にアグロバクテリウムを 感染させます。この方法だと、プラスミドが細胞の 中で漂っていて、運び込んだゲノム編集ツールの遺 伝子がゲノムに組み込まれない(外来の遺伝子が残 **らない**) 状態になることがあります。放っておけば 一定の確率で遺伝子が組み込まれますが、運び込ん だゲノム編集ツールの遺伝子はゲノムに組み込まれ る前から働きはじめ、一時的に大量のゲノム編集酵 素(今回はTALEN)が作られます。一時的に大量 に作られたTALENでゲノム編集が起こるはず、と 村中先生たちは考えました。しかし、ゲノム編集が 起こっているジャガイモをどうやって選抜するので しょうか。

普通は、プラスミドに本来ゲノムに組み込みたい 遺伝子と一緒に、何かしらの薬剤をかけると色が変 わったり、抗生物質を与えても死ななくなるような 働きをする遺伝子を載せておきます。その遺伝子が 組み込まれれば、色が変わったり、死なかったこと を目印として、目的とする細胞や個体を選抜できま す。しかし、今回は一時的に大量に作られた TALENでゲノム編集は起こっているものの"外来遺 伝子が組み込まれていないもの"を選抜したいので、 人海戦術が取られました。アグロバクテリウムを送 り込んだ茎組織を培養し、増えてきた細胞塊のゲノ ムを片っ端から分析しました。



マイクロチップ電気泳動装置を操作する安本助教 この装置でDNA/RNA断片の長さを分析 一度に多くのサンプルを扱えるので、人海戦術には 必須

「分析の担当者はかなり難色を示しましたが、だまされたと思って・・・と説得したところ、編集に成功した株が取れました。」と村中教授は苦笑いしながら教えてくれました。通常、抗生物質で選抜するときの成功確率は1/10ぐらいだそうですが、今回の方法で編集に成功した株を得られる確率は1/100ぐらいだったそうです。PCRでゲノム編集が成功していると思われる候補の個体を拾い、ゲノムを解析して、編集に成功しているかだけでなく外来遺伝子が残っていないことを確認します。また、SSR2が酵素として働いていないことは、ジャガイモに含まれる毒素の化学分析によっても確認しています。

「編集に成功している個体を引き当てる確率がもっと低かったらいやでしたね。」と村中教授は語りますが、それは事前に分かることではありません。ゲノムの分析担当者の忍耐が呼び込んだ幸運だったのかもしれません。



液体クロマトグラフィー質量分析装置(LC/MS) 試料中の分子を移動相中の移動速度で分離し、質量 を分析。毒素の化学分析はこれで行う。

外来の遺伝子が残っていないことは、野外で栽培 試験をするためにはぜひとも達成しておきたい条件 です。外来の遺伝子があると、生物多様性への影響 などについて評価を受ける必要があります。今回開 発した手法を'さやか'という品種に適用し、SSR2遺 伝子をゲノム編集で働かなくしたジャガイモは、組 換えが起こっていないことが無事に確認されて、 2021年4月から野外での栽培試験が始まったところ です。





野外栽培試験により収穫したジャガイモ (2022年秋収穫分)

# 新しいゲノム編集技術

天然毒素低減ジャガイモはTALENで成功しましたが、研究室ではCRISPR/Cas9を使って他の遺伝子を編集する試みも進めています。「TALENという手法にこだわるのではなく、あくまでも目的に合う技術を使うことが大切です。」と村中教授は話します。そして今、開発が進んでいる新しいゲノム編集技術にも期待しているそうです。

ベースエディティング(※10)と呼ばれるその技術は、DNAを切断するのではなく、例えば標的とする塩基に脱アミノ化という反応を起こすことで、塩基を"置き換える"ことができるものです。元々あるDNA上で局所的に起こる化学反応を利用しているので、遺伝子組換えには当たりません。この技術がもっと洗練されれば、酵素の活性、つまり働き方を

**計画的に変えることができるようになる**と期待されています。

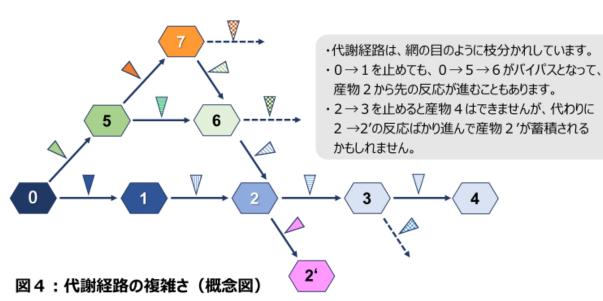
例えば、これまでは利用できていなかった物質を 利用できるようになったり、反応の強さを調節でき るようになったり、反応の結果できる産物をこれま でとちょっと性質の違うものにできたりするように なるかもしれません。その結果、毒素を作らないだ けでなく含まれる栄養素が変わり、今までよりもち もちした食感や、腹持ちのよいジャガイモが現れ、 新しい調理法や食べ方が生まれるかもしれません。

生体内で起こる代謝は、図4のように網目のよう に枝分かれしていて、分かれ道ごとに酵素が働いて います。

天然毒素低減ジャガイモで見られたように、**狙いを定めた酵素の機能を正確に失わせれば、どの代謝 経路に進むかを制御できる**かもしれません。

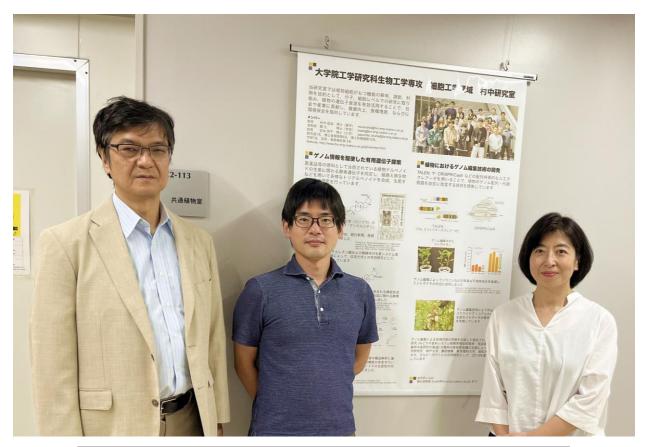
代謝経路の途中にある中間産物は通常、生体内にはわずかしか見られません。しかし、それが薬の材料になるような貴重な物質だった場合、あえて反応を途中で止めて、中間産物の新たな利用の仕方を考えるのも良いかもしれません。

多様で豊富な植物の代謝物質は"宝の山"、メタボロミクス研究はその宝に至る"地図"、ゲノム編集の技術は宝を取り出す"宝刀"になるのかもしれません。ゲノム編集によって、食用作物からどんな"宝"が生まれてくるのか、楽しみにしたいと思います。



六角形は物質で、三角形は酵素を表わしています。 色や模様の違いは、違う物質や酵素であることを意味しています。





村中俊哉教授(左)と安本周平助教(中)に研究室をご案内いただきました(右・筆者)。ありがとうございました。

### 村中 俊哉 (むらなか としや) 氏

大阪大学大学院工学研究科 教授

1985年、京都大学農学研究科農芸化学専攻修士課程修了。同年、住友化学工業株式会社に入社。1993年、京都大学農学研究科で博士(農学)を取得。

理化学研究所植物科学研究センターチームリーダー、横浜市立大学木原生物学研究所教授を経て、2010年より現職。現在、植物バイオテクノロジーに関わる研究に従事。

#### 安本 周平(やすもと しゅうへい)氏

大阪大学大学院工学研究科 生物工学専攻 助教

2017年、大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻博士後期課程 単位取得退学、博士(工学)を取得。 大阪大学大学院工学研究科での特任研究員を経て、2019年より現職。現在、植物代謝工学に関する研究に従事。

#### 森田 由子 (もりた ゆうこ)氏

科学技術振興機構「科学と社会」推進部 専門役

東京大学大学院理学系研究科で博士(理学)を取得。同大学大学院新領域創成科学研究科 先端生命科学専攻で助手を務める。

その後、製薬会社研究員を経て、2006年から日本科学未来館に勤務。2012年から2022年9月まで科学コミュニケーション専門主任、同年10月から現職。



### 【巻末参考資料】

<巻末参考1>RNA干渉(RNAi)とは

DNAを構成する塩基にはアデニン(A)、チミン(T)、グアニン(G)、シトシン(C)の4種類があり、AとT、GとCが互いに結合するという性質があります。この性質を相補性と言い、AとT、GとCは互いに相補的である言います。RNAを構成する4種類の塩基は、チミン(T)の代わりにウラシル(U)になっているため、AとU、GとCが互いに相補的ということになります。

遺伝子の塩基配列は、DNAからmRNAに写し取られて、それを元にタンパク質が作られますが、ある遺伝子のmRNAと相補的なRNAが結合して二本鎖RNAが作られると、その遺伝子の発現が抑制されるという現象があります。これをRNA干渉(RNA interfering: RNAi)と言います。これを利用することにより、細胞内の特定の遺伝子の発現を抑えることができます。

この現象を発見した2人の研究者は、2006年にノーベル生理学・医学賞を受賞しました。

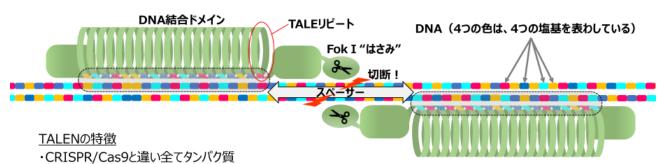
<巻末参考2>TALEN(Transcription Activator-Like Effector Nuclease)とCRISPR/Cas9の違い

TALENは、CRISPR/Cas9と違ってタンパク質だけでできています((参考)図1)。

そのため、標的となるDNAの塩基配列に結合できるようにするには緻密な設計が必要で、CRISPR/Cas9より使いこなすのが難しいと言われています。

他にも、"はさみ"の役目を果たす酵素Foklがペアにならないと働かないとか、ペアの間に丁度よい距離(スペーサーと呼ぶ)が空いていないといけないといった難しさがあります。

一方で、こうした難しさがTALENの結合と切断の正確さにつながっていて、目的遺伝子とは異なるゲノム配列に働きかけてしまうこと(オフターゲット)が非常に起こりにくいと言われています。



- "はさみ"はペア(DNA2本鎖のそれぞれに結合)になってはじめて働く
- ・2つの"はさみ"の間に丁度よい隙間 (スペーサー:14~20塩基) が必要
- ・34~35個のアミノ酸からなるTALEリピート(赤丸)の12番目と13番目のアミノ酸 (らせん一巻きの下部の網掛けのカラー部分(RVDと呼ぶ)が、DNAへの結合特異性を決定)
- ・TALEリピートの繰り返しの数だけ、結合の特異性があがる(黒破線枠が結合領域)

Nature Reviews Molecular Cell Biology vol.14, p.49-55を参考に作図

#### (参考) 図1:TALENとDNAの相互作用



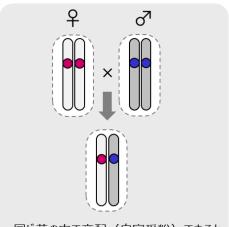
<巻末参考3>四倍体のジャガイモの育種はなぜ大変か

遺伝子は染色体上の位置が決まっていて、この"位置"を「遺伝子座」と言います。

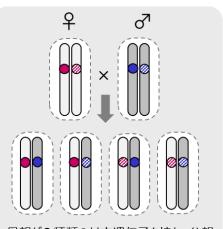
通常、一つの細胞の中には染色体のセットが複数(例えば、ヒトは2セット、ジャガイモの多くは4セット)ありますが、染色体のセットが複数あるときに、同じ「遺伝子座」にありながら塩基配列が違う配列たちを「対立遺伝子」と呼びます。配列が違うと言っても全然働きが違う遺伝子ということではなく、同じ働きを持つ遺伝子だけどちょっと違うというイメージです。

例えば、ABO血液型は3種類の対立遺伝子があります。ヒトは二倍体なので、そのうちどれか二つを誰もが持っていて、組み合わせによって4種類の血液型のいずれかになります。対立遺伝子の数は、染色体のセット数よりもたくさんありますが、一人のヒトが持つ対立遺伝子の数は最大二つで、同じものを持っている場合もあります。

母親と父親は、それぞれが持つ染色体の半分を子どもに引き継がせます。二倍体であるヒトは、両親から一つずつ、染色体のセットを受け継ぎます。その際、(参考)図2にあるように、母親が2種類の対立遺伝子を持ち、父親はまた別の対立遺伝子を持っている場合、染色体の組み合わせは2×2=4通りです。組み合わせの問題なので、母親が対立遺伝子を持っていなかったり、両親間で対立遺伝子がなかったりすると、組み合わせの数は減ります。



- ・同じ花の中で交配(自家受粉)できると、 繰り返し交配させて2セットの染色体の遺伝 情報がほぼ同じ、「純系」を作れます。
- ・両親が純系だと、両親から引き継ぐ遺伝子の組み合わせは各1通りなので、子どもの遺伝子の組み合わせも1通りになります。



・母親が2種類の対立遺伝子を持ち、父親もまた別の2種類の対立遺伝子を持つ場合、子どもの遺伝子の組み合わせは4通りになります。

#### (参考) 図2:二倍体の遺伝の仕組み

二倍体の生物は、染色体のセットを二つ持っています。メンデルが遺伝の 法則を発見したエンドウやヒトは二倍体です。

上図では、♀ (メス、めしべ・雌花) が持つ対立遺伝子は赤と赤斜線で、
♂ (オス、おしべ・雄花) は青と青斜線で表わしています。

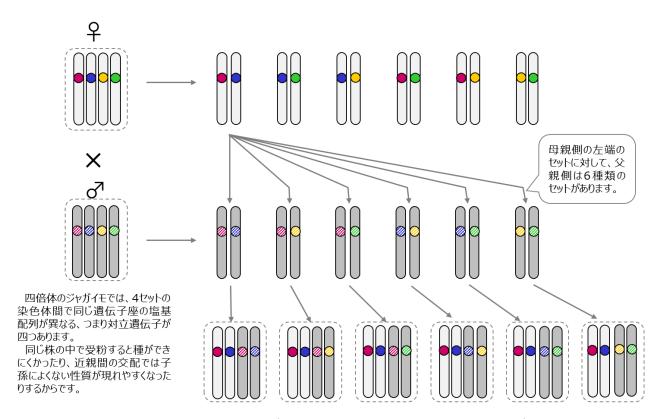


次に、四倍体であるジャガイモの場合の話をします。

ジャガイモにも、原種など二倍体のものはありますが、食用として重用されている品種のほとんどは四倍体です。メークインも男爵も四倍体です。四倍体になるとバイオマス、つまり食べられる部分が大きくなるため、育種の過程で四倍体が選ばれてきました。面倒なことに、四倍体のジャガイモが持っている染色体のセットは、互いに配列が異なっています。つまり、対立遺伝子がほとんどの場合4種類あります。

母親と父親が、それぞれ4種類ずつ対立遺伝子を持っているとすると、遺伝のパターンは(参考)図3のようになります。母親側が子どもに引き継がせるのは4種類の対立遺伝子のうち二つで、組み合わせ方は6種類になります。 父親側も同様なので、一回の交配で36通りの組み合わせができてしまいます。

一つの遺伝子座ごとにこれだけの種類の組み合わせができてしまうので、交配と選抜による育種は非効率的という言葉では片付けられないほど大変です。



子どもは、母親から2セット、父親から2セットのゲノムを引き継ぎます。 4種類のものから2種類ずつを組み合わせる方法は、6通りあります。 母親、父親それぞれに6通りあるので、全ての組み合わせは36通りになります。

バイオステーション「ゲノム編集が加速するジャガイモの品種改良 図1:交配によって生じる遺伝子の組み合わせの数」を参考に作図

#### (参考) 図3:四倍体の遺伝の仕組み



### 参考文献

- ※1 じゃがいもによる食中毒を予防するためにできること https://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/solanine/yobou/attach/pdf/yobou-9.pdf
- ※2 aff (あふ) バックナンバー 2017年11月号、特集 じゃがいも さつまいも(1) https://www.maff.go.jp/j/pr/aff/1711/spe1\_01.html 食品成分データベース https://fooddb.mext.go.jp/
- **%**3 FAOSTAT

https://www.fao.org/japan/portal-sites/fao-statistics/jp/FAOSTATのリンクに飛び、Yieldで検索。「Compare Data」のボタンを押し、Productionを選んだ後、期間、国、作物名を選ぶと、作物ごとの年間収量の変化データが得られる。これを作物間で比べると、コメやコムギよりも、ジャガイモのほうが単位面積当たりの収量が多いことがわかる(コメやコムギの約5倍)。

- ※4 梅基 直行, Kagaku to Seibutsu 53(12): 843-849 (2015) https://katosei.jsbba.or.jp/view\_html.php?aid=491
- X5 Shuhei Yasumoto, et al., Efficient genome engineering using Platinum TALEN in potato, Plant Biotechnology vol.36, p.167–173, 2019.
- ※6 RNA干渉 (RNA interfering: RNAi) https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/story/newsletter/keywords/04/03.html
- ※8 健やかな生活を支える林業のために~無花粉スギから広がる新しい林業~ https://www.affrc.maff.go.jp/docs/anzenka/genom\_syuzai2021/page1.html
- Shuhei Yasumoto, et. al., Targeted genome editing in tetraploid potato through transient TALEN expression by Agrobacterium infection, Plant Biotechnology vol.37, p.205–211, 2020.
- ※10 一塩基編集 (base-editing) https://bio.nikkeibp.co.jp/atcl/report/16/011900001/18/05/25/00178/
- ※番外 バイオステーション

https://bio-sta.jp/beginner/genomedescription/ゲノムやDNAなど、基本となる専門用語の解説情報がある。

大阪大学大学院工学研究科 生物工学専攻 細胞工学領域(村中研究室) http://www.bio.eng.osaka-u.ac.jp/pl/index.html