

ゲノム編集農作物の開発状況と今後の展望

はじめにーゲノム編集作物開発の背景と経緯ー

1996年に報告されたジンクフィンガーヌクレアーゼ（ZFN）に始まる「ゲノム編集技術」の登場により、人類は生物のゲノムを「狙って変化させる」実用的な技術を利用することができるようになった。さらに、2012年にダウドナとシャルパンティエが報告した「CRISPR/Cas9システム」（Jinek 2012）により、ゲノム編集は医療・農業・工業などの各分野でイノベーションを引き起こしつつある。このうち農業分野では、作物などが持つ遺伝子を効率よく変化させて改良し、様々な課題解決やニーズ対応に貢献する新しい「品種」を迅速に作る事ができる技術として、期待と注目が集まりつつある。

人類が作物などの遺伝子やゲノムの変化を利用するのは、何もゲノム編集技術に始まったことではない。我々人類は、作物の栽培や動物の家畜化を始めた時から、収量が多い、病虫害や乾燥に強い、美味しいなどといった、人類にとって有用な性質を持つ個体を「選抜」して利用することを繰り返してきた。そのような有用な形質は、一般的には作物がもともと持っている遺伝子が自然突然変異で変化し、さらに交配によって新たな組み合わせが生じることによって生み出される。つまり人類は、遺伝子が「変異」した生物の中から、農業的に有用な形質を持つも

のを「選抜」して利用することにより、農業を発展させ、豊かな生活と文明を築いてきたと言える。

しかし、従来の育種では、農業的に有用な変異を持つ系統・品種を作るために、数年から長いもので数十年にわたる長い期間と、多くの個体・系統を評価するための広い圃場やそれらを管理する労力・コストが必要とされてきた。これまでも、育種年限の短縮や省力化のために、DNAマーカー育種やゲノミックセレクションなど、多くの技術が開発されてきたが、そもそも目的に合う形質を持つ個体や系統（遺伝資源）が見つからない場合には、人為突然変異を利用して目的の変異を持つ個体を作り出す必要があった。

1920年代以降、突然変異原となる放射線や化学物質が発見されたことにより、遺伝子の変異を人為的に起こす「人為突然変異」を利用した育種が進められるようになった。我が国では、1960年に「放射線育種場」が設立され、ガンマ線を利用した突然変異育種が行われてきた。また、理化学研究所（理研）などにおけるイオンビーム照射も育種に利用されてきた。しかし、突然変異は一般的にランダムに生じるため、目的の変異を持つ個体を見つけて出すために多くの労力・コストや長い期間が必要とされたり、高倍数性作物では目的の変異が得られにくかったりといった問題点があった。

ゲノム編集技術は、ゲノム上の特定の部位を狙って変化させることができるため、目的の変異を効率よく得られ

農研機構 企画戦略本部
新技術対策室

高原 学

る点の特徴である。農業利用の観点から見ると、その具体的な利点には主として以下のようなものがある。

- ①新しい変異を創出する場合、従来の遺伝資源を探す手法や人為突然変異で作出する手法に比べ、大幅に短い期間や少ない労力・コストで目的とする変異を得ることができる。この点は、果樹などのように、世代が長い等の理由でもともと育種に長い時間が必要だった作物で効果が大きい。
- ②優良な形質を持つ品種をもとに変異を導入することによって、新品種に仕上げる期間を短縮することができる。多数の品種や新しい品種に同じ変異を導入したい場合にも、従来より短期間で品種を育成することができる。
- ③他の生物で解明された遺伝子の情報をもとに、同じ変異を再現して有用形質を得ることができる場合がある。（例として、コムギの穂発芽耐性、マダイの筋肉量増加など。次章で詳述。）
- ④標的とする遺伝子が複数あっても、配列が同じなら同時に変異させることが可能。この点は、ジャガイモ（主に四倍体）・コムギ（六倍体）・キク（六倍体）など、倍数性の高い作物の改変に強みを発揮する。自然突然変異や人為突然変異では一般的に配列に関係なく変異が生じるので、標的遺伝子が複数あった場合、全てが変異した個体を得られる効率は極めて低くなる。

このように、ゲノム編集技術を育種の大きな体系の中で見ると、基本的には変異創出もしくは育種素材作出の一手法として位置づけることができる。つまり、少なくとも現段階では、ゲノム編集技術を利用しても育種における交配や選抜といったステップの重要性は変わらず、ゲノム編集技術だけで育種の全てを置き換えられるわけではないと考えられる。

逆に、ゲノム編集技術の欠点としては以下のようなものがあり、これらを克服するための研究開発が進められている。

- ①標的となる遺伝子の配列や機能が知られていなければ、基本的に改変することができない。
- ②対象の作物ごとに、遺伝子 (DNA) もしくはタンパク質・RNP 等を生長・再生可能な細胞内へ導入する技術が必要。作物・品種によってはこれがまだ困難な場合がある。
- ③ゲノム編集作物の開発過程で外来 DNA (Cas9 遺伝子やガイド RNA 等) の導入が必要な場合に、遺伝子組換えの規制対象外として利用するためには、導入した外来 DNA を取り除く必要がある。多くの作物では、交配によって比較的簡単に取り除くことが可能だが、挿し芽・挿し木・いも等によって増殖する栄養繁殖性作物の場合、不稔などにより交配が難しいか、交配すると元の品種の特性が変わるなどの問題点がある。

なお、ゲノム編集技術の問題点として「オフターゲット」(本来の標的以

外の遺伝子・配列に対する変異導入) がしばしば取り上げられるが、これは確かに医療応用の場面では大きな問題になりうる。しかし農業利用 (育種) の場合には、もともと多くの未同定の変異を持った個体・系統をもとに、栽培試験による形質評価と選抜を経て品種が育成されて、食用にも供されている。ゲノム編集技術を利用する場合にも、形質評価と選抜は基本的に必要なので、この段階で問題のある個体・系統 (生育が悪い、病虫害に弱い、不味い等) は取り除かれる。従って、仮にオフターゲットが生じていたとしても、従来育種で開発された品種以上に問題が生じる可能性は考えにくい。

2. 国内で開発が進むゲノム編集農林水産物

世界的にゲノム編集への注目が高まるに伴い、我が国でも行政や研究者の間でゲノム編集 (を含む新育種技術: NBT もしくは NPBT) に関する議論が行われた。農林水産省では、2013 ~ 2015 年にかけて「新たな育種技術研究会」が設置され、その議論をもとに 2015 年 9 月に報告書 (新たな育種技術研究会 2015) が発表された。また、日本学術会議でも、2014 年 8 月に「植物における新育種技術 (NPBT) の現状と課題」と題する報告書 (日本学術会議 2014) を公表している。これらの議論と並行する形で、内閣府が実施した戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 1 期にもゲノム編

集に関する研究推進が盛り込まれ、ゲノム編集技術に関する研究が基盤技術開発から変異のリソース化・作物開発・社会実装戦略に至るまで、一体的に推進されることとなった。本稿がテーマとするゲノム編集作物の開発についても、この中での研究成果が現在でも国内の研究開発を主導している。この他、科研費等を活用した研究開発も進められた。

以下、具体的な作物ごとに注目して開発状況を概説する。

(1) トマト

日本国内での実用化を目指したゲノム編集作物の開発で、代表格はトマトだと言える。中でも、筑波大学の江面教授のグループは、ゲノム編集トマト開発のトップランナーと言えるだろう。江面教授のグループでは、それまでの突然変異体に関する研究の蓄積をもとに複数の形質について開発を進めているが、中でも実用化に向けた研究開発が最も先行しているのが、健康機能性成分 GABA (ギャバ: γ -アミノ酪酸) を高含有したトマトである (Nonaka *et al.* 2017)。

GABA は血圧上昇抑制やストレス緩和の効果が知られている機能性成分である。GABA 生合成酵素 GAD の C 末側は、通常状態では自身の活性中心をフタのように覆っているが、ストレス下ではフタが変形して外れ、酵素が活性化する。このフタにあたる部分をゲノム編集で取り除くことにより、実験系統 (マイクロトム) では野生型の

約 15 倍 (Nonaka *et al.* 2017), 実用系統 (愛知ファースト) で約 3~4 倍 (Lee *et al.* 2018) の高蓄積を達成した。トマトは一般的に GABA が比較的多い食品として知られるが, この高 GABA トマトを利用すれば, 通常の食生活で無理なく血圧上昇の抑制効果が得られると期待される。また GABA はグルタミンから合成されるアミノ酸の一種だが, 高 GABA トマトを分析した結果, その他のアミノ酸等の蓄積に有意な変化はなかった (Lee *et al.* 2018)。

筑波大学の開発した高 GABA トマトは, 商品化への取り組みが進行していることでも注目される。筑波大学発のベンチャー企業「サナテックシード」社が生産・販売等に向けた準備を進めている。

筑波大学では, 高 GABA トマトの他にも, ゲノム編集技術を利用して, 高日持ち性, 単為結果性 (トマト・ナス等で受粉せずに結実する性質) (Shimatani *et al.* 2017), 高糖度といった特性を持つトマトの開発が進められている。また, 徳島大学では単為結果性 (Ueta *et al.* 2017) など, 名古屋大学では高糖度, 農研機構 (食品研) では高日持ち性を持つトマトの開発 (Ito *et al.* 2015) がゲノム編集技術を用いて進められている。

(2) ジャガイモ (ばれいしょ)

ゲノム編集ジャガイモの研究開発は, 大阪大学や理研を中心としたグループにより進められている。その代

表的な目的形質は, 「天然毒素を低減したジャガイモ」である。

ジャガイモの芽や緑色の皮などには, 天然の毒素であるソラニン・チャコニン等のステログリコアルカロイド (SGA) が含まれている。流通・加工の現場では SGA を増加させない貯蔵管理等が必要であり, 育種でも SGA 含量の低い品種の育成が課題とされている。2014 年, 理研の梅基上級研究員らは, SGA がコレステロールを出発点として生合成されることを発見し, コレステロール生合成の酵素遺伝子として SSR2 を同定した (Sawai *et al.* 2014)。さらに, この SSR2 を標的として TALEN を用いたゲノム編集を行い, 4 つのアリル (対立遺伝子) が全て機能を失った場合に SGA 量が大幅に低減することを明らかにした。この研究では, 二次代謝産物の生合成経路を解明した基礎研究の成果が作物開発のブレイクスルーとなっており, ゲノム編集作物の開発に遺伝子機能の解明が欠かせないことを物語る典型例といえる。また, 4 つのアリル全てを人為突然変異で変異させる効率は極めて低いと予想されるが, ゲノム編集では, 配列に共通性があればまとめて標的とすることが可能となる。この研究は, 高倍数性作物 (ジャガイモの場合, 四倍体) の育種におけるゲノム編集の有効性を実証した例でもある。

ジャガイモは多くの品種で細胞質雄性不稔があるため自殖が難しく, 自殖できたとしても自殖弱性が現れる, 元々の遺伝子構成がヘテロなため元の

品種と特性が変わるなどの問題が生じる。従って, 導入した TALEN 遺伝子を交配で取り除いた上で, 元の品種の優良形質を再現することは現実的に難しい。そこで阪大や理研のグループは, 一過的発現でもゲノム編集が起こることに着目し, TALEN 遺伝子がジャガイモのゲノムに組み込まれることなく SSR2 に変異が生じた個体 (「当代ヌル」) の取得に成功した。栄養繁殖性作物であるジャガイモでは, イモ (塊茎) による増殖が可能のため, 得られたゲノム編集個体の特性等を評価して問題がなければ, そのまま増殖して品種化することも可能である。

これ以外にも, 阪大や理研のグループは, SGA 合成に関わる別の遺伝子を働かなくすることで, SGA を低減した上で萌芽も抑制できることを見出し (Umamoto *et al.* 2016), 保存中に芽が出ないジャガイモの開発も進めている。また, 東京理科大のグループは, ジャガイモのデンプン合成酵素遺伝子 GBSS を標的としたゲノム編集を, 翻訳エンハンサー dMac3 を組み合わせた CRISPR/Cas9 を用いて行うことで, アミロース含量の少ないもち性ジャガイモの開発に成功しており (Kusano *et al.* 2018), もちもちした新食感を持つジャガイモ品種の開発が期待される。

上記の研究者らを中心に, 研究者とジャガイモ業界関係者・関連企業などが連携してゲノム編集によるジャガイモ新品种開発を議論する場として, 「ジャガイモ新技術連絡協議会」が



図-1 さまざまな作物でのゲノム編集の応用
 (上段) 左上から：GABAを多く含むトマト実験系統（筑波大・江面教授提供）、天然毒素をほとんど含まないジャガイモ（阪大・村中教授提供）、高シンク能イネ（農研機構・小松博士提供）
 (下段) 左下から肉厚マダイ（京大・木下助教提供）、白いアサガオ（筑波大・小野准教授提供）、穂発芽しにくいコムギ（農研機構・安倍博士提供）

(4) コムギ

岡山大学や農研機構からなるグループにより、CRISPR/Cas9 システムを用いて「穂発芽耐性」を持つコムギが開発されている（Abe *et al.* 2019）。日本ではコムギの出穂期と梅雨の時期が重なるため、穂発芽耐性は麦類の育種において重要な形質とされているが、穂発芽耐性を持つ品種や遺伝資源はこれまで少なかった。

この研究の端緒となったのは、岡山大学や農研機構のグループによるオオムギの種子休眠に関わる遺伝子「Qsd1」の発見である（Sato *et al.* 2016）。オオムギでは、Qsd1 が機能しなくなると種子休眠が長くなる。研究グループはまず、コムギが持つ3種類のゲノムから Qsd1 の相同遺伝子をそれぞれ1つ、合計3つを特定して配列を比較し、共通配列を標的としたゲノム編集を行った。その結果、3つの Qsd1 全てが変異した場合のみ休眠が長くなり、穂発芽も抑制されることが明らかになった。コムギは六倍体であり、前述のジャガイモと同様、高倍数性作物の育種におけるゲノム編集の有効性が示された。また、二倍体のオオムギで解明された遺伝子情報をもとにコムギの遺伝子を改変する手法の有効性も示された。

この研究で研究グループがゲノム編集に用いたコムギは、組織培養や遺伝子組換えに適した海外の品種「フィルダー」で、国内で利用される穂発芽耐性コムギ品種を育成するためには、今後戻し交配

2018年7月に設立されており、商品化に向けた取組みの進展が期待される。

(3) イネ

イネはモデル植物の1つとして研究に多用されているので、遺伝子の機能解析等にゲノム編集が利用されたり、ゲノム編集技術開発の材料として用いられたりした例は多数あると思われるが、実用的な形質を備えたイネの研究開発としては、農研機構を中心としたグループが「超多収に向けたシンク能改変イネ」の開発に取り組んでいる（小松 2018）。イネ（コメ）の国内生産量は十分との声もあるが、中食・外食産業などで使用される事業用米は不足傾向にある。シンク能改変イネは事業用米や飼料用米としての利用を念頭に、多収化により生産コストの低減を図る狙いで開発が進められている。

「シンク能」とは、植物が穂などに光合成産物（デンプン）を蓄えることができる能力を指す。イネの穂の枝分かれを制御する Gnl1a（サイトカイニン分解酵素遺伝子）を改変することで粒数の増加をめざす系統と、粒長や粒重を制御する TGW6（インドール酢酸グルコース分解酵素遺伝子）を改変することで粒重の増加をめざす系統が作出されている。また、Gnl1a については、通常の CRISPR/Cas9 を使用

するものと、神戸大学の西田教授らが開発した「Target-AID」（CRISPR/Cas9 システムとヤツメウナギ由来シチジンデアミナーゼを組み合わせ、狙った部位の塩基を C から T へ書き換える技術）（Nishida *et al.* 2016）を使用したものが作出されており、いずれもコドンの読み枠がずれたりストップコドンが生成されたりすることで、Gnl1a の機能が失われ目的形質が発現する。

シンク能改変イネは、2017年度から農研機構（茨城県つくば市）の隔離圃場において野外栽培試験を開始している（農研機構 2017）。当時はまだゲノム編集作物の取扱いルールが定まっておらず、遺伝子組換え生物の第1種使用等にかかる環境大臣および文部科学大臣の承認を得た上で、栽培試験が実施された。この試験は、ゲノム編集作物としては国内初の野外栽培試験にあたる。この栽培試験では、収量性、穂の形態、米粒のサイズなどの形質が調査され、系統選抜が進められている。

この他、農研機構では、脂肪酸の不飽和化を触媒する酵素遺伝子 FAD2 をゲノム編集で働かなくすることにより、酸化されにくいなど健康に良いとされるオレイン酸の含有量を高めたイネを開発している（Abe *et al.* 2018）。

等が必要になると予想される。

一方、農研機構や(株)カネカからなる別のグループでは、コムギを材料として種子の茎頂組織へDNA等を直接導入する「in planta particle bombardment法」(iPB法)を開発し(Hanada *et al.* 2017)、ゲノム編集にも成功している(Hanada *et al.* 2018)。iPB法ではカルス培養と再分化のステップを経る必要がないため、難培養性の品種やコムギ以外の作物にも適用できる。今後、幅広い範囲の品種・作物への利用が期待される。

(5) 花き

花きでは、まず2017年に筑波大学の小野准教授らのグループが、アサガオのゲノム編集に世界で初めて成功した(Watanabe *et al.* 2017)。花の色素の一種アントシアニンの蓄積により花色が紫色となる品種に対し、アントシアニン合成酵素遺伝子DFR-BをCRISPR/Cas9システムを用いてゲノム編集することにより、「白いアサガオ」を作出した。アサガオは奈良時代に中国から伝来したといわれているが、その後江戸時代に白色のアサガオが初めて記録されるまで、約850年の年月を要した白色のアサガオが、ゲノム編集技術の利用により約1年で得られたことになる。

また、キクでも、2017年に農研機構のグループがゲノム編集に成功している(Kishi-Kaboshi *et al.* 2017)。この研究では、予め導入された蛍光タンパク質遺伝子を標的としてゲノム編集

を行い、蛍光が低下することを示した。今後、キクの実用的な形質への応用が期待されるが、キクは高倍数性(六倍体)、栄養繁殖性でゲノム配列も未解読など、育種が難しい点も多い。ジャガイモやコムギでの成功例を参考に、キクに適した技術開発が進むことが期待される。

また、岩手生物工学研究センターでは、CRISPR/Cas9によるトレニアとリンドウでの花色改変に成功している(Nishihara *et al.* 2018; Tasaki *et al.* 2019)。

花きは一般的に食用としないこともあり、遺伝子組換え技術により作出された青いカーネーション・青いバラも国内で商品化されている。そのため、消費者に受け入れられやすいとの予想から、ゲノム編集農作物の実用化は花きを優先的に進める方がよいとの声もある。いずれにしても、花きは近年品種の入れ替わりが早く、新品種開発の加速化への期待が大きい。ゲノム編集技術による迅速な品種改良が期待される。

(6) 果樹

果樹(樹木)はもともと育種年限が長いため、ゲノム編集による育種の加速化が特に期待されている。国内では、リンゴ・ブドウなどにおいて応用に向けた技術開発が進んでいる。

リンゴでは、徳島大学や農研機構などからなるグループによって、2016年に世界で初めてリンゴにおけるゲノム編集に成功した(Nishitani *et al.*

2016)。この時の変異体を得られた効率は、CRISPR/Cas9形質転換個体のうち最高で14%の高い効率に達した。標的はカロテノイド合成酵素をコードするPDS遺伝子で、農業的に有用な形質というよりは変異導入を視覚的に解析するためのモデルターゲットである。今後は自家和合性などの実用形質をめざした応用が期待される。

またブドウでも、農研機構のグループにより、やはりPDS遺伝子を標的として2017年にゲノム編集に成功している(Nakajima *et al.* 2017)。さらに果皮色を改変して「赤いシャインマスカット」を作出する研究が進められている。

果樹では世代が長く、また品種の遺伝子構成がヘテロなため、導入した外来DNAを交配でのぞくことは現実的ではない。今後、果樹における外来DNAを導入しないゲノム編集技術の確立が必要とされる。

(7) 魚類

京都大学の木下助教を中心としたグループにより、マダイ(近畿大学と共同)・トラフグ(水研機構と共同)におけるゲノム編集が進められている。代表的な目的形質は、筋肉量の増加による「肉厚なマダイ・トラフグ」である。ウシなどで知られるミオスタチン遺伝子(筋肉量の制御に関わる)の自然突然変異にヒントを得て、マダイ・トラフグでミオスタチン遺伝子に対するゲノム編集を行い、マダイでは約2割の筋肉量(可食部)の増加がみら

れた (kishimata *et al.* 2018)。この研究では、植物のように一時的な遺伝子組換えを経てゲノム編集を行うのではなく、魚の受精卵へ mRNA もしくは RNP を直接注入することによりゲノム編集を行っている。マダイではゲノム編集システムの第3世代以降が得られ、実用化に向けた準備が進められている。

また、水研機構では、養殖に適した「おとなしいマグロ」の開発が進められている (Higuchi *et al.* 2019)。同様にサバでも、養殖適性を高めるためゲノム編集で攻撃性を抑えたサバの開発が、九州大学で進められている。マグロをはじめ、天然の水産資源の枯渇が懸念されており、世界的に見ても漁獲から養殖へのシフトが予想される。養殖の生産性を高めるため、ゲノム編集の活用が期待される。

この他にも、ブロッコリー (自家和合性) (奥崎ら 2019)、スギ (無花粉スギ)、麴菌 (Katayama *et al.* 2016)、コオロギ (Watanabe *et al.* 2012)、ニワトリ (鶏卵) (Oishi *et al.* 2016) などで、ゲノム編集技術を利用した開発が国内で進められている。

3. 国外で開発が進むゲノム編集農林水産物

ゲノム編集技術により作出された農作物の商業化を世界で初めて公表したのは、デュボン社 (現 コルテバ・アグリサイエンス社) によるもち性トウモロコシ (ワキシークーン) である (Corteva Agriscience 2016)。2016

年の発表当時は「5年後に商業化」を予定するとしていたが、延期される見通しである。

現在のところ、世界で唯一、ゲノム編集食品として実用化されているのは、Calyxt (カリクス) 社により開発された「高オレイン酸ダイズ」である (Calyxt, Inc. 201a)。イネの項でも解説した FAD2 遺伝子を改変し、搾油した高オレイン酸ダイズ油がアメリカで販売されている。

他にも、褐変しないマッシュルーム、角のないウシ、ウドンコ病に強いコムギ、成長効率の高いティラピア (淡水魚)、食物繊維を増やしたコムギ、褐変しないロメイネラス、気候変動に対応したカカオ等のゲノム編集農林水産物の開発が報じられている。

4. 今後の方向性—どこへ向かうべきか?—

(1) ステークホルダーに理解され、利用されるゲノム編集作物の開発

以上で解説したゲノム編集作物の開発動向を見ても分かるように、ゲノム編集技術を活用して、さまざまなステークホルダー (消費者、食品・加工業者、生産者など) の課題解決やニーズ対応につながる作物 (品種) の開発が進んでいる。そもそもステークホルダーの課題やニーズは1つではないので、ゲノム編集作物が理解され受け入れられていくためには、この技術が生み出す多様なメリットが実感されるこ

とが必要となるだろう。

これは、遺伝子組換え技術の利用が、(少なくとも商業利用されている範囲では) 除草剤耐性や害虫抵抗性など、生産者に利点がある特性に集中していることは対照的に思われる。ゲノム編集作物による多様なメリットが実際に消費者へ届くためには、地域に根差した種苗メーカーのような中小規模の企業も含め、ゲノム編集作物に対する規制 (取扱いルール) を過度なものとししないことなど、この技術が広く使われやすい環境を醸成することが重要である。

今後、ゲノム編集農作物・食品への消費者の理解を深めるためには、まず、消費者がメリットを直接実感しやすい品種や食品の開発と、その商品化が進むことが大きな意義を持つ。ゲノム編集作物については、消費者の受容が広がらないことを懸念して、多くの企業がまだ様子見を続けている状況にある。しかし、開発・商品化が進み、消費者がそれらを手に取って良さを実感できるようにならなければ、その価値に対する理解もなかなか進まない。日本で最初に上市されると見込まれている高 GABA トマトは、消費者の健康維持に貢献するもので、市場にどのように受け入れられていくかが注目される。ただ、GABA の血圧上昇抑制効果やリラックス効果でメリットを感じる消費者もいれば、関心の低い消費者もいるだろう。消費者の多様な価値観に対応して、高 GABA トマトだけに留まらず、いろいろな作物・食品が続けて開発され上市されていくことを期

待した市場に上ることが望ましい。

一方で、生産者や食品・加工業者等に向けたゲノム編集作物の実用化においては、それがどのような課題解決につながり、我が国の農業や産業を支えるか、消費者の共感が得られるように丁寧に説明すべきだと思われる。例えば、日持ち性や単為結果性の改良は農家の作業軽減に貢献し、ひいては日本の農業を守ることを十分に説明すれば、理解は得られるのではないだろうか。近年、環境などに与える影響を考えながら消費行動を行う「エシカル消費」が注目されているが、このエシカル消費の観点からの説明も必要だろう。

今後のゲノム編集作物の開発においては、このような説明責任を果たし、消費者の理解を得ることまでを想定した目標・開発手法の設定などが求められる。それには、育種家・種苗メーカーとラボの研究者がさらに一体化した研究開発が必要だろう。ステークホルダーのニーズに合わせた農作物・食品をタイムリーに提供するため、最新の技術開発について情報収集し、必要な技術をいち早く取り入れて開発期間を短縮していくことも重要になる。

(2) ゲノム編集技術により開発される作物の方向性

ゲノム編集技術を利用してどのような作物を優先的に開発すべきか、についてはいろいろな意見があるだろうが、ゲノム編集技術は基本的に、農業分野の多様な課題解決やニーズ対応につながる品種を迅速に開発できる有用

な技術ということができる。

最近注目される開発の1つの方向性として、「健康機能性」がある。我が国の国民医療費は年間42兆円を超え、国家予算における負担も増加しており、この抑制が喫緊の課題である。その対策として「食を通じた健康の増進」があり、農林水産物や食品が持つ健康機能性成分が注目されている。その成分の合成経路が解明されていれば、ゲノム編集により機能性成分の量を高めた農作物の開発が可能であり、実際に高GABAトマトや高オレイン酸ダイズが開発されている。

もう1つの方向性、「持続可能（サステイナブル）な社会」の実現、もしくは「SDGs」への対応がある。気候温暖化などの地球規模の環境変動を背景に、SDGs（持続可能な開発目標）への対応が国際的なテーマとなっている。我が国でも、「持続可能な開発目標（SDGs）推進本部」により「SDGsアクションプラン」が策定されており、2019年6月に決定された「バイオ戦略2019」でも、持続可能な循環型社会の実現が謳われている。これに貢献する育種目標として、例えば、フードロスを削減するような日持ちの良い作物、バイオプラスチックやバイオ燃料の原料となるようなバイオマス資源作物の改良への利用などが考えられる。

(3) おわりに —最新の技術を活用して、生活を豊かにする—

ゲノム編集で開発された農林水産物・食品などが利用され、普及してい

くには、国民レベルの理解、そもそも農作物などに「品種」があって、品種改良の成果の上に我々の豊かな食生活がある、という認識が広がる必要がある。人類がようやく手にしたこの技術を有効に活用していくために、安全性などにも配慮しつつ、研究者から消費者までコミュニケーションを取りつつ利用していくことが重要と考えられる。

引用文献

- Abe, K. *et al.* 2018. Production of High Oleic/Low Linoleic Rice by Genome Editing. *Plant Physiol. Biochem.* 131, 58-62. DOI, 10.1016/j.plaphy.2018.04.033
- Abe, F. *et al.* 2019. Genome-edited triple-recessive mutation alters seed dormancy in wheat. *Cell Rep.* 28, 1362-1369. DOI, 10.1016/j.celrep.2019.06.090
- 新たな育種技術研究会 2015. 「ゲノム編集技術等の新たな育種技術（NPBT）を用いた農作物の開発・実用化に向けて」 <https://www.affrc.maff.go.jp/docs/committee/nbt/top.htm> (2015年9月)
- Calyxt, Inc. 2019. “First Commercial Sale of Calyxt High Oleic Soybean Oil on the U.S. Market.” <https://calyxt.com/first-commercial-sale-of-calyxt-high-oleic-soybean-oil-on-the-u-s-market/> (Feb. 26, 2019)
- Corteva Agriscience 2016. “DuPont Pioneer Announces Intentions to Commercialize First CRISPR-Cas Product.” <https://crispr.corteva.com/resources-crispr-cas-corteva-agriscience/> (Apr. 18, 2016)
- Hamada, H. *et al.* 2017. An in planta biolistic method for stable wheat transformation. *Sci. Rep.* 7, 11443. DOI, 10.1038/s41598-017-11936-0
- Hamada, H. *et al.* 2018. Biolistic-delivery-based transient CRISPR/Cas9 expression enables in planta genome

- editing in wheat. *Sci. Rep.* 8, 14422. DOI, 10.1038/s41598-018-32714-6
- Higuchi, K. *et al.* 2019. Targeted mutagenesis of the ryanodine receptor by Platinum TALENs causes slow swimming behaviour in Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*). *Sci. Rep.* 9, 13871. DOI, 10.1038/s41598-019-50418-3
- Ito, Y. *et al.* 2015. CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of the RIN locus that regulates tomato fruit ripening. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 467, 76-82.
- Jinek, M. *et al.* 2012. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337, 816-821. DOI, 10.1126/science.1225829
- Katayama, T. *et al.* 2016. Development of a genome editing technique using the CRISPR/Cas9 system in the industrial filamentous fungus *Aspergillus oryzae*. *Biotech. Lett.* 38, 637-642.
- Kishi-Kaboshi, M. *et al.* 2017. Generation of gene-edited *Chrysanthemum morifolium* using multi-copy transgenes as targets and markers. *Plant Cell Physiol.* 56, 216-226. DOI, 10.1093/pcp/pcw222
- Kishimoto, K. *et al.* 2018. Production of a breed of red sea bream *Pagrus major* with an increase of skeletal muscle mass and reduced body length by genome editing with CRISPR/Cas9. *Aquaculture* 495, 415-427. DOI, 10.1016/j.aquaculture.2018.05.055
- 小松晃 2018. 「イネのゲノム編集, 野外栽培試験の開始と社会実装に向けたアウトリーチ活動」 *化学と生物* 56, 819-825.
- Kusano, H. *et al.* 2018. Establishment of a modified CRISPR/Cas9 system with increased mutagenesis frequency using the translational enhancer dMac3 and multiple guide RNAs in potato. *Sci. Rep.* 8, 13753. DOI, 10.1038/s41598-018-32049-2
- Lee, J. *et al.* 2018. Utilization of a genome-edited tomato (*Solanum lycopersicum*) with high gamma aminobutyric acid content in hybrid breeding. *J. Agric. Food Chem.* 66, 963-971. DOI, 10.1021/acs.jafc.7b05171
- Nakajima, I. *et al.* 2017. CRISPR/Cas9-mediated targeted mutagenesis in grape. *PLoS ONE* 12, e0177966. DOI, 10.1371/journal.pone.0177966
- 日本学術会議 2014. 「植物における新育種技術 (NPBT : New Plant Breeding Techniques) の現状と課題」 <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-h140826.pdf> (2014年8月)
- Nishida, K. *et al.* 2016. Targeted nucleotide editing using hybrid prokaryotic and vertebrate adaptive immune systems. *Science* 353 (6305): aaf8729. DOI, 10.1126/science.aaf8729
- Nishihara, M. *et al.* 2018. Application of the CRISPR/Cas9 system for modification of flower color in *Torenia fournieri*. *BMC Plant Biol.* 18, 331. DOI, 10.1186/s12870-018-1539-3
- Nishitani, C. *et al.* 2016. Efficient genome editing in apple using a CRISPR/Cas9 system. *Sci. Rep.* 6, 31481. DOI, 10.1038/srep31481
- Nonaka, S. *et al.* 2017. Efficient increase of γ -aminobutyric acid (GABA) content in tomato fruits by targeted mutagenesis. *Sci. Rep.* 7, 7057. DOI: 10.1038/s41598-017-06400-y
- 農研機構プレスリリース 2017. https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nias/075170.html (2017年4月)
- Oishi, I. *et al.* 2016. Targeted mutagenesis in chicken using CRISPR/Cas9 system. *Sci. Rep.* 6, 23980. DOI, 10.1038/srep23980
- 奥崎ら 2019. 「ブロッコリーにおけるCRISPR/Cas9を利用したSP11遺伝子のゲノム編集」 *日本植物細胞分子生物学会大会講演要旨集* 37, 168.
- サナテックシード社 <https://sanatech-seed.com/#About>
- Sato, K. *et al.* 2016. Alanine aminotransferase controls seed dormancy in barley. *Nat. Commun.* 7, 11625. DOI, 10.1038/ncomms11625
- Sawai, S. *et al.* 2014. Sterol side chain reductase 2 is a key enzyme in the biosynthesis of cholesterol, the common precursor of toxic steroidal glycoalkaloids in potato. *Plant Cell* 26, 3763-3774. DOI, 10.1105/tpc.114.130096
- Shimatani, Z. *et al.* 2017. Targeted base editing in rice and tomato using a CRISPR-Cas9 cytidine deaminase fusion. *Nat. Biotech.* 35, 441-443. DOI, 10.1038/nbt.3833.
- SIP 第1期 「次世代農林水産業創造技術」 <http://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/brain/sip/sip1/index.html>
- Tasaki, K. *et al.* 2019. Effects of knocking out three anthocyanin modification genes on the blue pigmentation of gentian flowers. *Sci. Rep.* 9, 15831. DOI, 10.1038/s41598-019-51808-3
- Ueta, R. *et al.* 2017. Rapid breeding of parthenocarpic tomato plants using CRISPR/Cas9. *Sci. Rep.* 7, 507.
- Umamoto, N. *et al.* 2016. Two cytochrome P450 monooxygenases catalyze early hydroxylation steps in the potato steroid glycoalkaloid biosynthetic pathway. *Plant Physiol.* 171, 2458-2467. DOI, 10.1104/pp.16.00137
- Watanabe, K. *et al.* 2017. CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of the dihydroflavonol-4-reductase-B (DFR-B) locus in the Japanese morning glory *Ipomoea (Pharbitis) nil*. *Sci. Rep.* 7, 10028. DOI, 10.1038/s41598-017-10715-1
- Watanabe, T. *et al.* 2012. Non-transgenic genome modifications in a hemimetabolous insect using zinc-finger and TAL effector nucleases. *Nat. Commun.* 3, 1017. DOI, 10.1038/ncomms2020