

## ゲノム編集が引き出す植物の未知なる可能性 —ゼロエミッション, マイナスエミッションに向けて—

遠藤真咲\*

[キーワード]: ゲノム編集, CRISPR/Cas9, 育種,  
品種改良

### 1. はじめに

約 35 億年前, 地球の大気の 96% は二酸化炭素で占められていた. その後, 植物が誕生し, 光と二酸化炭素から酸素を生み出し, 徐々に大気中の酸素濃度が高まることによってオゾン層が形成された結果, 動植物の陸上生活が可能になった. また, 植物は酸素の供給源であると同時に, 食品や建材, 紙製品, 繊維, 燃料として利用され, 今日の間人生活にとって不可欠であることは言うまでもない. 一方, 豊かな暮らしの追求は, 化石燃料の使用や森林伐採, 農耕地拡大による生態系の破壊を引き起こし, 干魃や水害が世界的な問題となっている.

植物は多様な環境に適応するために DNA を変化させ, 数十億年かけて多様な進化を遂げてきた. さらに約 1 万年前, 農耕の開始とともに, 人類は積極的に植物を選抜, 改良し, よりよい暮らしの実現を目指してきた. そして今日, 生物の遺伝情報を自由自在に書き換えることができる『ゲノム編集』の手法も手に入れた. 本稿では, バイオテクノロジーのビッグバンともいえる『ゲノム編集』を利用することにより, 植物が持つポテンシャルをどのように高められるのか, そして, カーボンニュートラルの実現にどう貢献できるのかを考えてみたい.

### 2. 人類による植物改良の歴史 —従来育種とゲノム編集—

育種とは生物を遺伝的に改良して新しい品種を作成することである. 育種という概念を持つ以前から, 人類は, 育てやすく, 美味しい実をたくさんつける個体を選んで種を増やし, その種を植えることを繰り返してきた. 現代農業においては, 別の品種を掛け合わせたり (図 1A), 耐病性など優れた性質を持

つ野生種を探索し, エリート品種にかけ合わせたり, 放射線照射によって突然変異を誘発するなどして (図 1B), 積極的に作物を作り替えてきた. これらの方法は, 遺伝子の多様性を拡大させる非常に有効な育種法であるが, 掛け合わせた品種の遺伝子の混ざり具合や, 放射線照射により変異が生じる遺伝子を指定することはできないため, 期待する性質を持った個体が確実に得られる保証はなく, 多くの個体の中から有望な個体を選抜するには多くの時間と労力を必要とした.

一方, ゲノム編集は, 狙った遺伝子をピンポイントで改変できる技術であり, 代表的なゲノム編集技術が CRISPR/Cas9 システムである (図 1C). CRISPR/Cas9 システムは元々, 微生物の免疫システムとして見出されたものであり (Jinek et al., 2012), Cas9 タンパク質と guide RNA という二つの物質の複合体が外敵の DNA 配列を見つけて結合し, DNA を切断するシステムを指す. CRISPR/Cas9 システムが特定の DNA 配列を見つけて切断するメカニズムが解明され, 動物や植物の DNA 切断にも応用できることが証明されたことにより, ゲノム編集は一気に現実的なものとなった. CRISPR/Cas9 システムによって動物の特定の DNA 配列を切断し, 切断部位の修復エラーによって遺伝子が改変されたことを報告した論文発表 (Cong et al., 2013 ; Jinek et al., 2013 ; Mali et al., 2013) からわずか 7 年後の 2020 年, CRISPR/Cas9 の発見者である 2 名の研究者にノーベル化学賞が授与されたことは, この技術のインパクトの大きさを物語っている. CRISPR/Cas9 の登場をきっかけに, その基本原理を応用したゲノム編集技術が次々と開発され, 塩基の挿入や欠失, 入れ替えも可能になってきた. これらの技術を使うことで, 自由自在に遺伝子を編集できる日も近いと感じている.

\*農研機構 生物機能利用研究部門 (Masaki Endo)

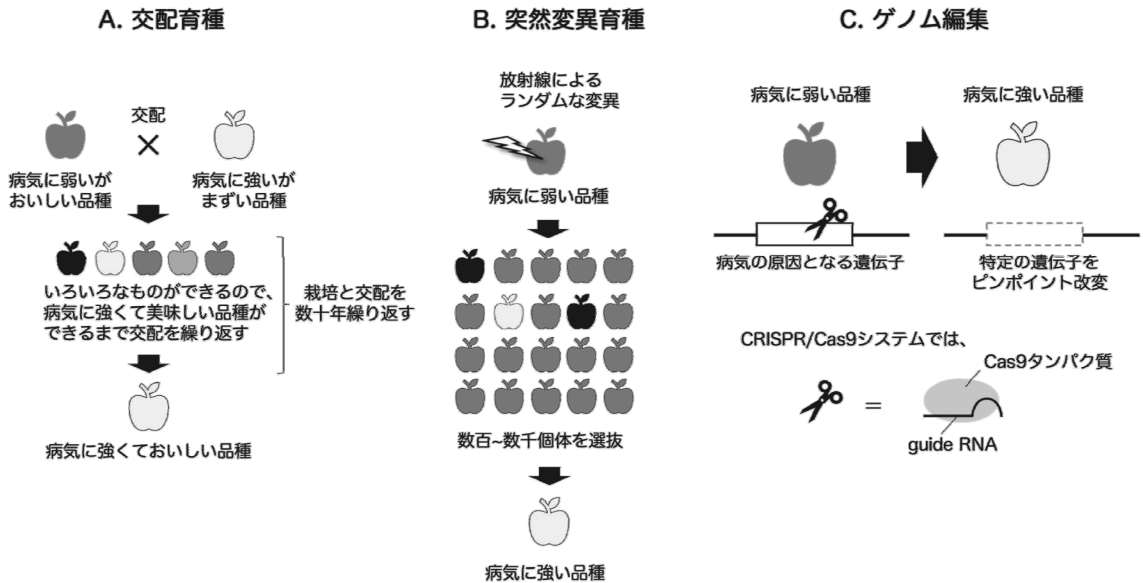


図1 植物育種法の比較

A：交配育種 異なる品種を掛け合わせることで、それぞれの品種が持つ良い性質を併せ持つ個体を作成する。  
B：突然変異育種 ランダムに変異を導入し、目的の性質が現れた個体を選ぶ。C：ゲノム編集 狙った遺伝子をピンポイントで改変する。

### 3. 脱炭素につながる植物のポテンシャルとゲノム編集

ゲノム編集は育種を加速する有望な技術であるが、この技術を活かすには、“どの遺伝子をどのように変えれば、期待する性質が現れそうか”という予測を立てる必要がある。近年、さまざまな植物の全ゲノム配列が解読され、ゲノム中にどんな遺伝子があり、どんな機能を担っているか明らかになりつつある。機能が明らかになっている遺伝子の中には、ゲノム編集でほんの少し変えることによって、直接、あるいは間接的に、炭素の吸収増加や排出抑制に貢献しうるものもあるので、その例を紹介したい。

前述した通り、植物は二酸化炭素を吸収し、その炭素固定産物は私たちの生活にさまざまな恩恵を与えてくれる。しかし、同時に植物の生産、加工、流通の過程では多くの二酸化炭素が排出されている。ゲノム編集による植物の改良は、植物が本来有する二酸化炭素吸収能力、貯蓄能力を最大限に活かすことはもちろんだが、植物由来製品の生産、流通、消費の過程において排出される二酸化炭素排出の削減にも貢献できるのではないだろうか。

**光合成能の向上** 植物は光合成によって毎年数百億

tもの二酸化炭素を大気中から除去しており、除去された炭素の半分は植物の根や土壌に貯留される。光合成は光エネルギーを利用して、二酸化炭素と水から有機化合物を作り出す非常に複雑な化学反応であるが、長年の研究から、反応の鍵となる酵素も同定されつつある。ゲノム編集により、光合成の反応経路を最適化することができれば、積極的な二酸化炭素の吸収が可能となり、イネの場合、有益な遺伝子改変を何重にも重ねることで、植物体に取り込む炭素の量を30%以上増やせると見積もっている研究者もいる。

**窒素利用効率の向上** 窒素はタンパク質の元となるアミノ酸の合成に必須であるため、作物の生育に欠かせない。窒素肥料の化学合成が可能になったことで作物の収量は飛躍的に向上したが、窒素肥料の化学合成には大量のエネルギーを要するため、世界の二酸化炭素排出量の1%はこの過程で生じるとも言われている。さらに、大量に投入された余剰窒素肥料は農地からの窒素やメタンの排出につながり、温暖化の原因となっている。そこで、低窒素施肥条件下でも高い収量を維持できる作物の開発に向けて、根から窒素が取り込まれるメカニズムや、植物体で窒素がどのようにアミノ酸に変換されるのかを明ら

かにする研究が進んでいる。また、土壌中には大気中の窒素ガスをアンモニアに変換し、窒素源として植物に供給する微生物も存在するため、その微生物と植物の関係性を解明する研究も進んでいる。これらの知見を活かしたゲノム編集を行い、少ない窒素肥料でも生育可能な作物ができれば、温暖化ガス排出の削減につながると考えられる。

**フードロスの削減** FAOの報告書によると、フードロスにより発生する二酸化炭素の量は自動車からの排出量にも匹敵すると言われている(参考1)。フードロスは、食品の生産、貯蔵、加工、食品製造、流通の過程で生じる廃棄全般を指すため、フードロス削減に効果的なアプローチも様々である。例えば、摩擦や切断による変色は消費者に好まれないため、加工野菜や果物の廃棄の一因となっているが、レタスやマッシュルーム等で、空気と接触した部分の褐変を抑えるゲノム編集に成功している。また、ジャガイモは緑色になった皮や芽に、食中毒の原因となる毒素が貯まるため、貯蔵中に日が当たることで芽が出たジャガイモは廃棄される。理化学研究所、大阪大学、神戸大学の共同研究グループは、ゲノム編集によって、毒素を作らないジャガイモの作出に成功しており(Yasumoto et al., 2020)、農研機構において、野外圃場での栽培試験も行われている。さらに、植物や果実の老化に関わる遺伝子も明らかになっており(Ito et al., 2017 他)、ゲノム編集によってその遺伝子を改変し、日持ちを向上させる試みも行われている。

**食料自給率の向上** 食糧の多くを輸入に頼っている我が国の食糧輸入に伴う二酸化炭素の排出量は、年間1億6,900万tと世界でも群を抜いて高い(参考2)。そこで、輸入依存度の高い農作物の自給率を上げることも二酸化炭素排出の削減につながる。国内の小麦消費量のうち、国産小麦の占める割合は20%を下回っており(参考3)、世界的な天候不順やウクライナ侵攻による国際的な価格高騰を受けて食料安全保障の面からも自給率の向上が求められている。コムギの自給率を上げるためには、作付け面積を増やすことはもちろんだが、日本の気候に合った品種を開発することも重要である。コムギは西アジアの乾燥地域が原産であるため、高温多湿の日本と相性がいい作物とは言えない。特に、収穫時期となる7-8月に長雨が続き、穂についた状態の種子が発芽して



図2 ゲノム編集で作出した穂発芽耐性コムギ  
左：元品種，右：ゲノム編集コムギ。  
ゲノム編集コムギは、水分があっても穂についた状態では発芽しない。  
写真は Abe et al. (2019) Graphical Abstract を改変。

しまう穂発芽や、受粉時に籾が開く際に、籾中にカビが入って毒素を産生する赤カビ病が発生する。岡山大と農研機構の共同研究によって、ゲノム編集による穂発芽耐性小麦の作出に成功しており(Abe et al., 2019, 図2)、現在、圃場試験栽培が行われている。赤カビ病耐性についても、籾の開閉に関わる遺伝子を改変して、籾を開かなくすることでカビの侵入を防ぐ試みが行われている。

#### 4. ゲノム編集だからできること、 その可能性を広げるために必要なこと

ゲノム編集は、生物がもともと持っている遺伝子を変化させる技術であるため、自然界でも同じ変化は起こりうる。世界各地で野生種を収集したり、突然変異を誘発することで、有用な個体を見つけ出すことも理論上は不可能ではない。しかし、同じ遺伝子を4個ずつ持つジャガイモや、6個ずつ持つコムギの場合、同一遺伝子全てに偶然変異が入る確率はかなり低い。そのため、全ての同一遺伝子を変えないと性質が変わらない場合、突然変異によって期待する植物体を獲得することは困難である。一方、ゲノム編集の場合は、複数の遺伝子を同時に改変することも可能であるため、前述した、毒を作らないジャガイモや、穂発芽耐性コムギを数年のうちに作出することができた。イネやトマトが有する同一遺伝子は2個であるが、ジャガイモ、コムギ以外にも、同じ遺伝

子を多数持つ植物は多く、サツマイモは 6 個、イチゴは 8 個ずつ同じ遺伝子を持つ。同一遺伝子を多数もつ種が多いことも、植物育種においてゲノム編集への期待が大きい理由の一つといえる。ただ、ゲノム編集を行うには、そのツール (Cas9 タンパク質や guide RNA) を直接細胞に入れるか、Cas9 タンパク質と guide RNA を植物自身に作らせるために、それらのコードが書き込まれた DNA を細胞の中に入れる必要があり、物質導入の難しさは植物種によって大きく異なる。ゲノム編集を多様な植物種で実現するには、DNA や RNA、タンパク質の導入法の開発など、周辺技術の開発も重要であることを付け加えておきたい。

## 5. まとめ

1980 年代半ばに地球温暖化の問題が大きく取り上げられるようになってから約 40 年、温暖化防止の重要性は認識しながらも、先進国に暮らす人々が危機感を持つことは少なかったと思う。しかし、ここ数年の世界各地の異常気象は、この問題が他人事ではないこと、問題の解決を先送りにする猶予は残されていないことを世界中の人々に実感させたのではないだろうか。本稿を執筆するにあたって、日々の生活の中で何ができるか、研究者としてこの問題解決にどう貢献できるかを考えた時、できることは後回しにしない、小さな貢献であってもそれを積み重ねていくことが重要であるとの思いに至った。工学的な手法と異なり、植物の遺伝子をほんの少し変える

ことで劇的な効果を期待することは難しいが、遺伝子の書き換えを可能にする画期的な科学技術である『ゲノム編集』が植物の迅速な改良を可能にし、ひいては脱炭素社会の実現に活かされることに期待したい。

## 引用文献

- 1) Abe F. et al. (2019) Genome-edited triple-recessive mutation alters seed dormancy in wheat. *Cell Reports* 28, 1362-1369.
- 2) Cong L. et al. (2013) Multiplex genome engineering using CRISPR/Cas9 systems. *Science* 339, 819-823.
- 3) Ito Y. et al. (2017) Re-evolution of the rin mutation and the role of RIN in the induction of tomato ripening. *Nature Plants* 3, 866-874.
- 4) Jinek M. et al. (2012) A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337, 816-821.
- 5) Jinek M. et al. (2013) RNA-programmed genome editing in human cells. *eLife* 2, e00471.
- 6) Mali P. et al. (2013) RNA-guided human genome engineering via Cas9. *Science* 339, 823-826.
- 7) Yasumoto S. et al. (2020) Targeted genome editing in tetraploid potato through transient TALEN expression by *Agrobacterium* infection. *Plant Biotechnology* 37, 205-211.

## 参考

- 1) World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/champions-call-reduce-global-food-loss-and-waste?utm%20campaign=socialmedia&utm%20source=pinterest.com&utm%20medium=worldresources>
- 2) 農林水産省 (2008) 中田哲也 (北陸農政局 企画調整室長) 「フード・マイレージについて」 <https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/goudou/06/pdf/data2.pdf>
- 3) 農林水産省 「知ってる？ 日本の食料事情 ～日本の食料安全保障と食料自給率・食料持久力～」 <https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/>