

品種改良、遺伝子組換え、ゲノム編集は何が違うのか？

野村 真

京都府立医科大学生物化学教室

先日、妻に聞いてみました。

「遺伝子組換え食品って、あるじゃん。あれって、食べたいと思う？」

「う～ん・・・っていうか、そもそも『遺伝子組換え食品を含まない』って書いてあるのは見たことがあるけど、『含んでます』ってわざわざ書いてあるのは見たことがないな～」

「じゃあ、もし目の前にあったとして、買う？」

「う～ん、買わないかな・・・」

「なんで？」

「なんとなく、自然じゃないな～って感じ。でも、品種改良と遺伝子組換いの何が違うのかって言われると、よくわからないな」

おそらく、生命科学や医学の研究者、あるいはよほどこうした分野に興味関心がある人でない限り、品種改良と遺伝子組換いの違い、ましてや「ゲノム編集」については「よくわからない」という人が大半だと思います。「遺伝子組換え」という言葉は、「PCR」と同様に、もともと分子生物学の専門用語でした。ここ数年、生物学に全く興味のなかった妻や子供たちまで「PCR」「抗原」「変異株」なんて言葉を使い出して、僕は本当にびっくりしています。スマートフォンがどうやって作動しているのかを知らなくても、スマートフォンを使うには全く問題がないように、こうした専門用語の「内容」を知らずとも会話は十分成り立ちます。しかし、ときとしてそれが誤解や偏った考え方の原因になってしまうこともあります。今回は、こうした生命科学の用語である「品種改良」「遺伝子組換え生物」そして「ゲノム編集」について、簡単な説明を試みたいと思います。こうした技術の最も大事な点についてできるだけわかりやすく解説する、というのが目的ですので、細かい説明はあえて省いております。その点をご了解ください。

遺伝子、DNA？

そもそも、遺伝子やDNAが何かということも、正確には知らない人も多いと思います。「人の外見や正確を決めるもの」「親から受け継ぐもの」「本質」「運命」・・・そんなイメージを抱く人も多いのではないのでしょうか。遺伝子=DNA、と思っている人もいるかもしれません。本来であれば、遺伝子とDNAについて、物質的な説明を

始めるべきなのでしょうが、ここは「文系の人でもわかる生物学」を目指さなくては
いけません。そこで、以下のような走り書きがあったとしましょう。

Idenshihadnatoonajinanodesyouka?

こんな暗号のようなメールを送りつけられたら速攻で迷惑メールボックス行きです
ね。でも、これを「翻訳」してみたらどうでしょうか。

遺伝子は DNA と同じなのでしょうか？

これなら意味はわかります。この場合、idenshihadna..というのが「DNA」に相当し、
「idenshi」「ha」「dna」「to」に相当するものが「遺伝子」に相当します。すなわ
ち、DNA というのは「遺伝子」という暗号を含む文章です^{注1}。実際、分子生物学でも
「翻訳」という言葉を使います。ここでもし、文章に多少の変更が加わって
「idenshi?ha」となっても、「遺伝子?は」と翻訳され、ちょっと変な文章になりま
すが、まあ意味はわかります。でも、さすがに「dna」が「bts」に変わってしまうと、
「遺伝子は BTS と同じなのでしょうか？」となり、意味不明の文章になりますね。で
も、文章を打ち込むと必ずタイプミスが生じます。多少のタイプミスならば許容され
ますが、あまりにミスが多かったり、重要な単語のタイプミスがあったりすると本来
の文章の意味が変わってしまいます。親から子供に DNA を伝えるということは、非常
に長い文章をそのまま逐一打ち込むという作業に他ならず、必ずタイプミスが生じま
す。

品種改良とはなにか

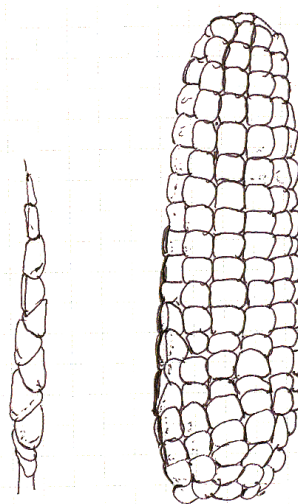
「遺伝子は BTS と同じなのでしょうか？」という文章は、一見意味不明ですが、特定
の人にはビビッとくるかもしれません。この文章に興味を持ったり、さらに文章を変
えてみたくなったりする人もいるかもしれませんね。これがいわゆる「品種改良」と
いう行為です。品種改良というのは、さまざまな生物を交配させ、継代していく中で
出てきた「変わり者」に注目し、それを選んで継代していくことで、人間の目的に合
った特徴を持つ生物を作り出していく行為です。ただ、この場合あくまで文章の変更
は「偶然のタイプミス」に依存しています。文章を打ち込むのはあくまで「生き物自
身」であり、人間が文章を打ち込んだり変更したりすることは、これまでできなかった
のです。

偶然のタイプミスを期待して文章を変えていくなんで途方もない作業ですが、それで
も人間はこの行為によって信じられないくらいたくさんの文章改変を行ってきました
た。現在私たちがスーパーで購入する野菜や果物、肉類のほぼすべてが、こうした

「偶然のタイプミス」によって作り出された生物です。現在市場に流通している栽培品種や畜産動物、さらにペットなどの愛玩動物はすべて、長い年月をかけて野生種からの品種改良によって作製されてきました。たとえば今私たちが口にするトウモロコシはもともと中米（メキシコ、グアテマラ）に自生するテオシントと呼ばれる植物が起源であることがわかっています。テオシントはトウモロコシとは一見似てもにつかない形をしていますが、「偶然のタイプミス」が起こったテオシントを繰り返し交配していく過程で、現在のトウモロコシができあがりました。少し専門的な話をすれば、テオシントが持つ遺伝子の中で *tga1* という遺伝子にタイプミス（変異）が生じたことが、テオシントのかたちに劇的な変化をもたらしたことがわかっています。テオシントとトウモロコシは今から 9200 年前に別の道を歩みはじめたようです。またコムギは今から 1 万年ほど前に栽培化が始まったようですが、その起源は現在のトルコ・アナトリア高原周辺であることがわかっています。栽培種の原種（祖先種）を辿る旅は、人類の歴史と文明のはるかな起源を辿る旅とも言えます。



テオシント



テオシントとトウモロコシ

遺伝子組換え生物の誕生

1970 年代に、生命科学における革命的な技術が開発されました。DNA という文章が、偶然のタイプミスではなく、研究者自身によって書き換えられるようになったのです。このようにして文章が書き換えられた生物のことを「遺伝子組換え生物」と呼ぶようになりました。ここで大事な点は、文章の書き換えそのものは品種改良でも行われてきたということです。しかし遺伝子組換えという技術を使うと、偶然のタイプ

ミスに頼っていたためにとてつもなく長い時間がかかっていた作業を一気に短縮することが可能になりました。

では、品種改良でできた生物と、遺伝子組換えでできた生物では、何が違うのでしょうか？多くの場合、遺伝子組換え生物の DNA にはある特徴があります。「遺伝子は DNA と同じなのではないでしょうか？」という文章の「DNA」を「BTS」に変更したい場合、遺伝子組換え技術を用いると「遺伝子は*BTS*と同じなのではないでしょうか？」というふうに、「**」が入るのです。これは**をつけないと BTS という単語（遺伝子）が打ち込めない（DNA に入らない）、という技術的な問題です。この**に相当する部分は、専門用語で「ベクター」と呼びます。遺伝子組換え生物の DNA には多くの場合このベクターの痕跡が残ります。この**が入ると生物にどのような影響を与えるのかは、一概には言えません。ただ、この**が入っているかどうかは、品種改良された生物なのか、遺伝子組換え生物なのかが区別できる1つの目安になります。

食品に限らず、遺伝子組換え技術はさまざまな場面で私たちの生活を支えています。例えば、インスリンというタンパク質をご存じでしょうか。膵臓（すいぞう）から分泌されるホルモンの1つですが、血糖値を下げる役割があります。糖尿病はインスリンが働かなくなる疾患です。インスリンは20世紀初めに発見されましたが、その当時は数マイクログラム（1マイクログラムは1グラムの千分の1）のインスリンを得るために数十キロのウシの膵臓からタンパク質を抽出しなければなりませんでした。しかし遺伝子組換え技術が確立されたおかげで、1978年にヒトのインスリン遺伝子を組み込んだ大腸菌が作製され、ヒトインスリンを大量に合成できるようになりました。今や、遺伝子組換え技術はさまざまな医薬品の作製に欠かせないものとなっています。

ゲノム編集技術の誕生

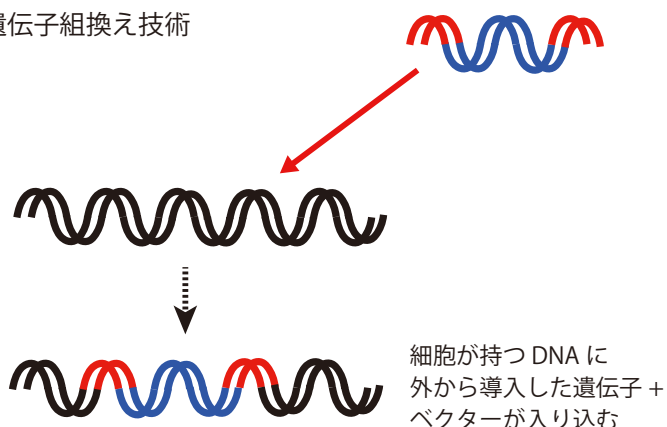
遺伝子組換え技術は画期的なものではありませんでしたが、課題もありました。1つは先に述べたように**のような痕跡が DNA に残ってしまうことです。また、文章中に*BTS*のような単語を加えることは容易にできますが、痕跡を残さず特定の文字を削るような作業、例えていうなら「遺伝子は DNA と同じなのではないでしょうか？」の最後を削って「遺伝子は DNA と同じなのではないでしょうか？」とするような文章改変は非常に難しかったのです^{注2)}。

ところが10年ほど前に「ゲノム編集」という技術が確立されました。特に「クリスパー(CRISPR/Cas9)」という技術は、それまでの遺伝子組換え技術では難しかった作業がとても簡単に行うことができたため、世界中で爆発的に普及しました。この技術開

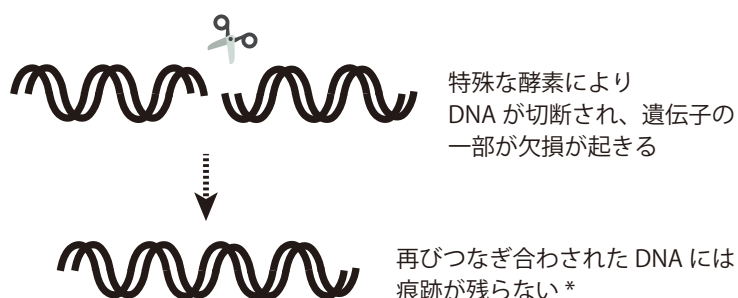
発に大きな貢献をしたジェニファー・ダウドナ博士とエマニュエル・シャルパンティエ博士には 2020 年ノーベル賞が贈られました（ここでは、ゲノム編集技術 = クリスポーと定義します）。

クリスポーがどのような技術なのか、その原理の詳細はあえて省きますが、一言で言えば「狙った箇所の文章 (DNA) を、痕跡を残さず削る (改変する) 技術」と説明しておきましょう。クリスポーを用いることにより、私たちは DNA という文章を自由に改変することが可能になりました。さらに、できあがった生物の DNA には痕跡が残りません。この時点で、私たちは「遺伝子は BTS と同じなのですか？」という文章が品種改良によって作られたのか、あるいはクリスポーによって作出されたのか、もはや区別をすることはできなくなりました。実際に環境省のルールでは DNA 改変の痕跡が残っていない生物に関しては規制の対象外になっています^{注3)}。

遺伝子組換え技術



ゲノム編集技術 (クリスポー)



* ヌクレオチド (DNA の構成要素) を欠損させることで遺伝子の情報を変える編集の場合

遺伝子を改変した生物が何故できるのか？

では、なぜ遺伝子を改変した生物が作製可能なのでしょうか？「そういう技術ができ

たからだ」という答えはもちろん正しいのですが、ここでは少し違う視点から考えてみましょう。多くの人が、冒頭で述べたように遺伝子=本質、あるいは運命、のようなイメージを持っているのであれば、遺伝子が改変された生き物というのは、自然界には存在しえない、ある種のモンスターのような印象を抱くかもしれません。DNAや遺伝子が変化した生物を作出する（選び出す）という行為は、品種改良もクリスパーも同じです。品種改良によって、テオシントからトウモロコシが作出された過程では、わずか数種類の遺伝子の変異が関わったと考えられています。遺伝子の変異（改変）は、ときとして生き物のかたちや性質を大きく変えることがあるのです。一方で、遺伝子が変化した結果、体の構造や機能にあまりに大きな影響が出れば、その個体は生存できないでしょう。遺伝子の改変は、家の増改築を行う行為と似ています。多少の改造ならば許容範囲ですが、大黒柱を抜くような劇的な改造を行ってしまうと、建物としての強度が持たないかもしれません。テオシントからトウモロコシの変化は確かに劇的ですが、ある意味それはテオシントに備わっていた能力とも言えます。言うなれば、DNAや遺伝子の変化を「許容する」ポテンシャルが、その生物にすでに存在しており、だからこそ私たちは遺伝子改変生物を作製することができるのだと思います。現在、地球上に存在するさまざまな生物は、「祖先種が持っていた遺伝子の変化」によって生まれてきたはずで、その過程で、「祖先種が持っていた許容範囲」内で変化した生き物が、次世代に子孫を残していったとも考えられます。遺伝子改変によって新しい特徴が生き物に備わったとして、それは生き物がもともと持っていた能力を少し変化させただけであり、私たちが「生命を『操作』した」ように感じても、生き物からしてみれば所詮私たちの行為は「お釈迦様の掌の中にいる孫悟空」と同じなのかもしれません^{注4)}。

「ジュラシック・パーク」の中で、人工的に作製された恐竜は野外では絶対に繁殖できないように操作されている、と主張する研究者に対して、数学者であるイアン・マルコム博士は「生命は、（生きる）道を探す」と警告を發します^{注5)}。ゲノムDNAの配列がすべて解読され、自在に遺伝子の改変が可能になったとしても、私たちは生物の持つ驚くべきポテンシャルについて、ほんの少ししか理解していません。品種改良、遺伝子組換え、そしてゲノム編集によって、生物の特性が変化する、という事実が一体何を意味するのかをじっくりと考えることは、生命をもう一度捉え直す良い機会になるのではないのでしょうか。

注1) DNAは「デオキシリボ核酸」という物質の略称です。また分子生物学における「翻訳」は、遺伝子から写し取られたRNAからタンパク質ができる過程をさします。また「遺伝暗号」という用語もありますが、これは3つの塩基配列で指定されるアミノ酸情報

のことですので、本稿で言うところの「暗号」とは必ずしも一致しません。本稿での文章を例えとした表現は、あくまで遺伝子を「情報」と捉え、DNA や遺伝子の変異（改変）による影響をわかりやすく説明するためのものであることをご了解ください。

注²) 実際には、遺伝子組換え技術で作製された生物（トランスジェニック生物）では、細胞外から導入された遺伝子は細胞内のゲノム DNA のどこに挿入されるのかコントロールできません。CRISPR 技術はこの点においても、ねらった箇所の DNA を削ったり、外から遺伝子を挿入できたりするという点で、画期的です。

注³) クリスポーを用いても、外から導入した核酸やその複製物が残存する場合、カルタヘナ法の規制対象となります (<https://www.env.go.jp/press/> 【資料 2-1】ゲノム編集技術を活用される方へ（日本語）.pdf)

注⁴) 孫悟空が世界の端から端まで飛んだと思っても、実は釈迦の右手から一歩も外に出てはいなかった、という逸話。

注⁵) 実際、恐竜が実験室外で繁殖する能力を獲得していた、というお話になっています (JURASSIC PARK, Michael Crichton, Ballantine Books, 1990)。

本稿の執筆にあたり、以下の文献や書籍を参考にしました。より深く学びたい方は、ぜひ読まれることをお勧めします。

- ・トウモロコシの起源—テオシント説と栽培化に関わる遺伝子— 福永健二、「ドメスティケーション—その民族生物学的研究」国立民族博物館調査報告 84:137-151 (2009)
- ・遺伝子 親密なる人類史（上・下）シッタールタ・ムカジー著 早川書房 (2018)
- ・CRISPR（クリスポー）究極の遺伝子編集技術の発見 ジェニファー・ダウドナ著 文藝春秋 (2017)

また、テオシントは食べられるのか？について検証した加藤まさゆきさんのブログ「1 万年前のトウモロコシでポップコーンを作る」はなかなか面白い内容となっています。

<https://dailyportalz.jp/kiji/111021149096>