3回シリーズ特集

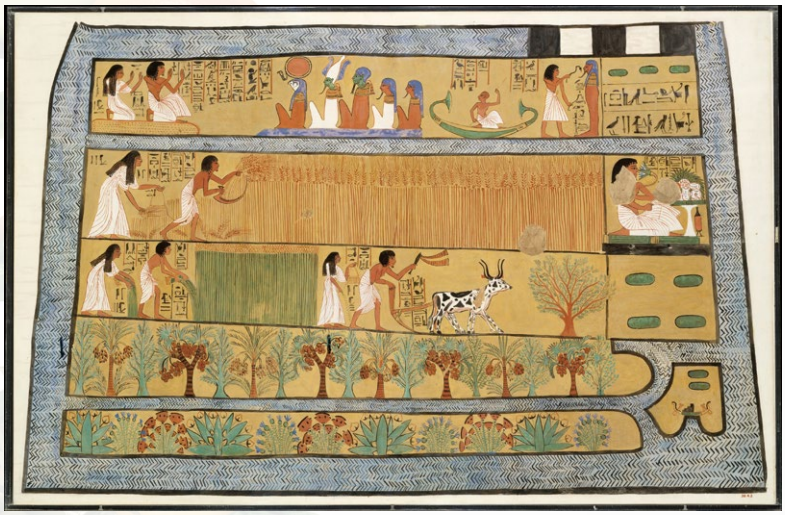
日本でいよいよ始まるか！
遺伝子組換え作物の生産とその未来

Part1
遺伝子操作の２万年の歴史

遺伝子組換え（GM）作物は75カ国以上で栽培、実地試験、貿易されており、世界の農家にとって不可欠な生産ツールの一つとなっている。そのGM技術なしに世界の農産物と伍してきた日本の農家にとって、新たな時代が幕を開けようとしている。GM作物の本格的な生産開始である。その長い道のりと未来を３回のシリーズ特集でお伝えする。シリーズ１回目は「遺伝子操作の２万年の歴史」。遺伝子操作が農業・食料・健康の分野で人類の繁栄にいかに貢献してきたか。どのように社会に受容されてきたか。東京大学名誉教授・唐木英明氏が縦横無尽に解き明かす。

食の信頼向上をめざす会代表
東京大学名誉教授
唐木英明

農学博士、獣医師。1964年、東京大学農学部獣医学科卒業。同大学助手、助教授、テキサス大学ダラス医学研究所研究員を経て、87年に東京大学教授、2003年に名誉教授。その後、倉敷芸術科学大学学長、日本学術会議副会長、内閣府食品安全委員会専門委員などを歴任。



人類は先史時代から遺伝子操作は行ってきた

遺伝子操作の歴史

遺伝子は生物の設計図

「遺伝子組換え」とか「バイオテクノロジー（バイテク）」と聞くと、最近始まったよく分からない不安な技術と思う人もいるだろう。しかし遺伝子操作は少なくとも2万年前に始まり、そのおかげで人類が今日の繁栄を享受できるようになったのだ（**表1**）。

遺伝子は生物の設計図であり、生物が有用な性格を持っているということは、優れた設計図を持っているということである。もし設計図を書き換えることができれば、どんなに優れた生物でも作ることができるだろう。これが遺伝子操作なのだが、大昔の人たちはもちろん遺伝子があることさえ知らなかった。にもかかわらず、彼らは育種という形で経験的に遺伝子操作を行っていた。

選択的育種と文明の発展

2万年前に私たちの祖先は狩猟採集生活から農耕生活に移行した。農耕に最も必要なものは優秀な作物である。野生の大麦、小麦、米、豆などを農地で栽培し、収量が多く、味が良く、病気に強いなどの優れた性質を持つものを選んで栽培することで、農耕に適した品種を作り出した。また違った品種と交配させることで、両方の品種の優れた点を併せ持つ品種を作り出すという選択的育種を行った。しかし、優秀な品種を交配すれば必ず優秀な子孫ができるわけではない。

ある女優が高名な哲学者に「私たちが結婚したらあなたの頭脳と私の容姿を持ったすばらしい子どもができるでしょうね」と言ったところ、哲学者は「私の容姿とあなたの頭脳を持った子どもができるかもしれませんよ」と答えたという話がある。

これは真実で、かけ合わせる2つの品種が持つ劣った性格を合わせ持つ子孫ができる可能性があるため、選択的育種は運を天に任せ

表1 人類による遺伝子操作年表

2万年前	狩猟採集生活から農耕生活に移行が始まった
1万年前	農耕に適したイネの育種に成功してイネの栽培を始めた
9千年前	大麦、小麦の栽培が始まった
8千年前	メソポタミア文明
5千年前	エジプト文明
4千600年前	インダス文明
3700年前	中国文明
…	
1663年	フックが細胞を発見

細胞を発見した
ロバート・フック

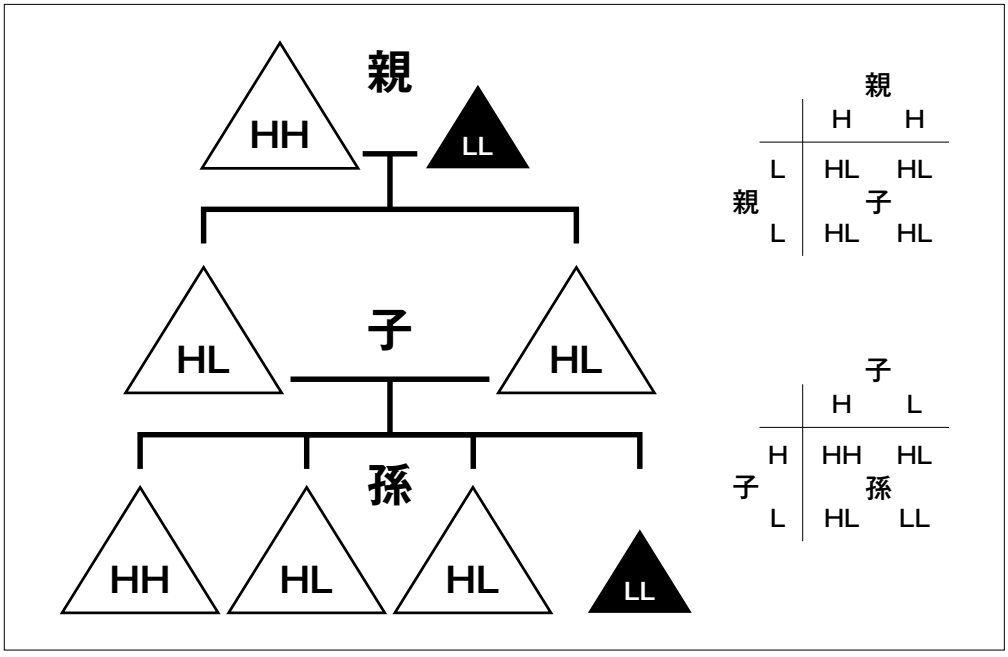
るような方法だ。また努力の結果は作物を収穫するまでは分からないため長い年月がかかる。私たちの祖先は何百年、何千年の時間をかけて多くの失敗を乗り越えて選択的育種に成功し、米、大麦、小麦、トウモロコシ、豆などの優秀な品種を作り出した。農業が盛んになり食料が豊富になると人口が増える。小さな集落が次第に大きくなり、世界にはメソポタミア文明・エジプト文明・インダス文明・中国文明の四大文明が生まれた。

　このように私たちの祖先は経験的に遺伝子操作を行っていたのだが、親が持つ性質が子どもにどのように伝わるのか、その仕組みは知らなかった。だれもが思いつくのは、赤と白を混ぜるとピンクになるように、両親が持つ性質が混合して中間の性質を持つ子供になるという仕組みだ。しかし実際はそうではない。

メンデルの法則

　これを明らかにしたのがオーストリアの僧であるメンデルだった。彼はエンドウ豆を使って親の性質が子どもに伝わる仕組みである「メンデルの法則」を1865年に発見した。図に示すように、背が高い親と低い親の子どもは、すべて背が高かった。子ども同士を交配すると、背の高い孫が3、背が低い孫が1できた。

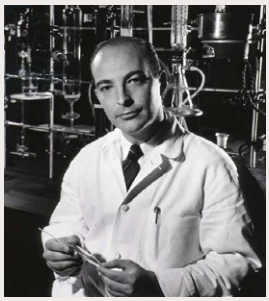
　これをメンデルは次のように説明した。背の高い親は背を高くする因子（現代風に言えば遺伝子）Hを2つ持ち、背が低い親は背を低くする因子Lを2つ持つ。子どもは親から2つの因子の半分ずつを受け継ぐので、全員HLになる。HとLの両方を持っていると、Hの性質だけが現れるので、背は高くなる。子ども同士（HLとHL）を交配すると、孫は、HH、HL、HL、LLの4種類ができる。だから背が高い孫が3、低い孫が1になるというものだ。



メンデルの法則

■グレゴール・ヨハン・メンデル。メンデルの法則は、遺伝学を誕生させるきっかけとなった

1865年　メンデルの法則の発見
1882年　ブラウンが細胞内の核を発見
1902年　サットンが遺伝子は染色体にあることを提唱
1953年　ワトソンとクリックがDNAの二重らせん構造を発見し、DNAが遺伝子であることが分かった
1956年　コーンバーグがDNAの複製を作る酵素ポリメラーゼを発見


DNAの生合成のメカニズムを解明したコーンバーグ

1961年　ブレナーがDNAの遺伝情報に従ってタンパク質を合成するのがメッセンジャーRNA（mRNA）の役割であることを発見
1961年　タンパク質は20種のアミノ酸からで

血液型がＡＯ型とＢＯ型の両親から、ＡＯ型、ＢＯ型、ＡＢ型、Ｏ型の子どもが生まれるのも、このメンデルの法則で説明できる。

こうして、親の性格が子どもに伝わるのは二つの色を混ぜるような単純なものではなく、それぞれの性質を持つ特定の遺伝子があること、さらに、ある遺伝子を持っていても、その性質が隠されてしまい、必ずしも生物の形には現れないことも分かった。この発見が近代的な育種の基礎になった。

その後、細胞の核の中から遺伝子が発見され、それがメンデルが言う特定の因子であることが分かった。遺伝子の研究が大きく発展したのはそれから約１００年後の１９５３年にワトソンとクリックが遺伝子を作るデオキシリボ核酸（ＤＮＡ）の立体構造を明らかにしてからだ。ＤＮＡはＡ（アデニン）、Ｔ（チミン）、Ｇ（グアニン）、Ｃ（シトシン）という４種類の化学物質が連なったひも状の形であり、折りたたまれて染色体となって細胞の核に入っている。

Ａ、Ｔ、Ｇ、Ｃの並び方はＤＮＡ上の場所によって違い、「コドン」という構造を作っている。細胞はコドンの情報に従って違うアミノ酸を作る。自然界には５００種類以上のアミノ酸があると言われるが、私たちの身体のタンパク質を作っているのはそのうちの20種類であり、その１つでも不足するとタンパク質を作ることができない。

画期的な遺伝子組換え

動物も植物も基本的には精子と卵子が合体した受精卵が分裂してできたものなので、精子と卵子の両方の遺伝子を持つ。ときには分裂の過程で遺伝子のコピーミスが起こり、両親とは違った性質を持つこともある。さらに病原体や化学物質などの外部要因でも遺伝子に変異が起こる。これを利用したのが放射線育種だ。作物に放射線を照射すると、遺伝子に突然変異が起こる。もし有益な変異が起これば、育種に利用される。もし有害な変異が起これば、その動植物

米国で使用が承認された最初の組換え医薬品
ヒトインスリンのヒューマリンN

きているが、各アミノ酸を作る遺伝子の構造である「コドン」が解明され、遺伝子の暗号が解読された

１９６５年

遺伝子組換えの道具として多用されるプラスミドの発見。またＤＮＡを切断する「制限酵素」や、切断したＤＮＡを修復する「リガーゼ」が発見され、遺伝子組換えが可能になった

１９７３年

最初の遺伝子組換え体が作成された

１９７８年

大腸菌を使ったヒトインスリンの開発により、バイオテクノロジー産業が急速に成長した

は成長できなかったり、遺伝性疾患などの病気になることもある。

このような仕組みが分かれば、元々の遺伝子に別の働きを持つ遺伝子の一部を組込むことで、有用な性格を与えることや病気の治療を行うことが可能になる。選択的育種も放射線育種も運を天に任せるようなところがあるが、遺伝子を直接操作すれば、育種が計画通りに短時間でできる。この画期的な方法を組換えDNA技術、あるいは遺伝子組換えと呼ぶ。

遺伝子組換えの利用

最初に遺伝子組換え技術を応用したのが、大腸菌などの微生物に医薬品を作らせることであり、多くの命を救っている。さらに病気の治療にも応用されているのだが、これらについては後で詳しく述べる。

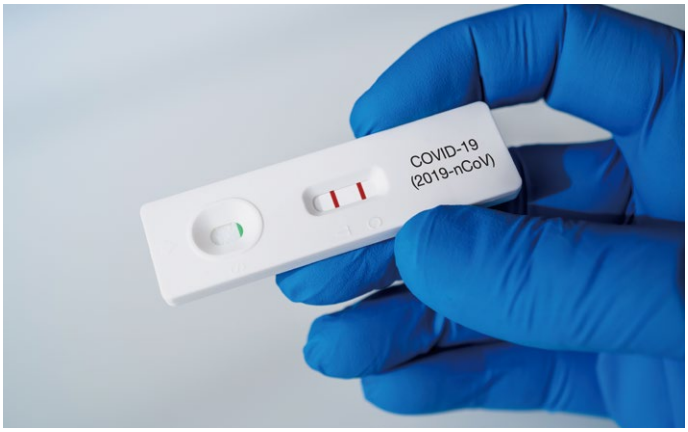
PCR検査とコロナワクチン

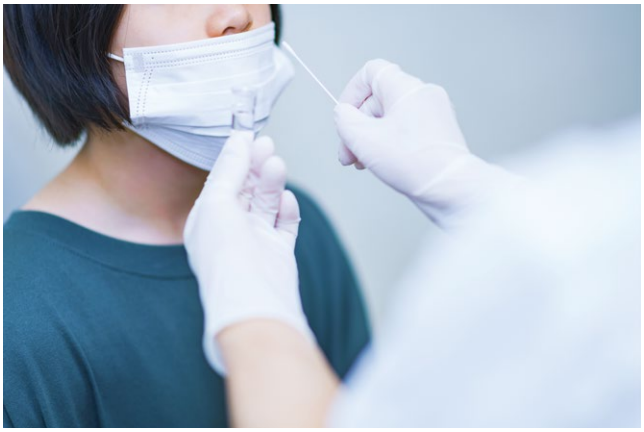
遺伝子操作の技術は検査にも応用されている。コロナで有名になったPCR検査は、コロナウイルスの微量の遺伝子を、検査ができる量まで増幅する技術である。PCR検査は親子鑑定や、犯罪者や被害者の身元判定にも使われ、熊本産と表示されていたアサリが実は中国産だったことや、新潟産コシヒカリという表示のコメが実は他県産だったことを明らかにするなど、食品偽装の摘発にも利用されている。

コロナワクチンはメッセンジャーRNA（mRNA）ワクチンと呼ばれている。mRNAはDNAの情報を細胞に伝えてタンパク質を作らせるメッセンジャーの役割を持つ。そこで、コロナウイルスの表面にあるスパイクタンパク質を作るmRNAを作成して、これを注射すると、体内でスパイクタンパク質が作られる。するとこれに対する抗体が増加して免疫が活性化し、コロナウイルスを攻撃するのである。

農業における遺伝子組換え

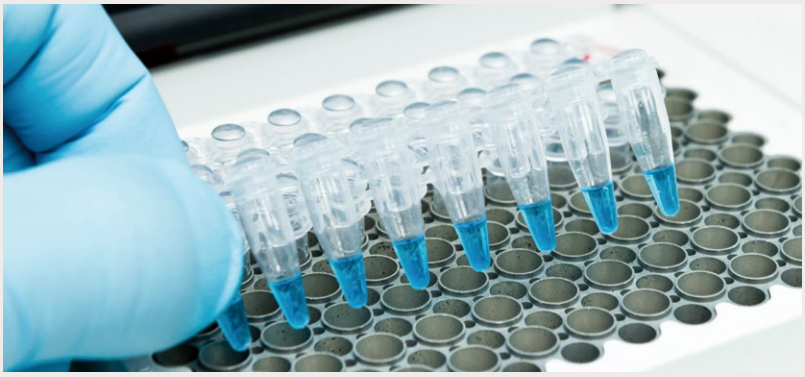
遺伝子組換え技術の利用は医薬品分野だけでない。農業分野では害虫抵抗性作物と除草剤耐性作物





1979年　ヒト成長ホルモンが初めて合成された

1983年　DNAの一部を複製できるポリメラーゼ連鎖反応（PCR）を開発。バイオテクノロジー研究と製品開発における主要なツールになった



1986年　B型肝炎ワクチンであるヒト用の最

が作られ、世界各地で栽培され、世界の食料の安定供給に大きな役割を果たしている。さらに、渇水に強い作物、病気に強い作物、ビタミンなどの有効成分を強化した作物などが作られている。

２００４年に国連食糧農業機関ＦＡＯは遺伝子組換え作物が発展途上国の貧しい農家や消費者を助けると述べた。また、発展途上国で商業栽培されているほとんどの遺伝子組換え作物は先進国で開発された除草剤耐性と害虫抵抗性作物で、その種類は綿、ダイズ、トウモロコシが主なものだが、発展途上国ではバナナ、キャッサバ、ササゲ、イネ、ソルガムなど広範囲の作物を必要としていると述べている。

こうして人類が農耕生活を始めてから今日までの最大の課題である作物の育種は、試行錯誤の選択的育種や放射線育種から、確実に目的を達成できる遺伝子組換えに変わり、育種の速度も効率も飛躍的に進歩した。そしてこれは作物にとどまらず、樹木、家畜、魚にまで広がり、食料の安定供給だけでなく、渇水抵抗性の作物の作成など環境問題の解決にも役立っている。

遺伝子組換えダイズの畑

１９８８年　最初の病害虫抵抗性トウモロコシが生産された

１９９０年　免疫障害を患う４歳の少女に初めて遺伝子治療が成功した

１９９４年　遺伝子組換え作物の商業栽培開始

１９９４年　最初の乳がん遺伝子が発見された

１９９５年　Ａ型肝炎の最初のワクチンが開発された

１９９６年　パーキンソン病を引き起こす遺伝子が発見された

１９９７年　アイルランドの科学者イアン・ウィルムットは、羊の細胞から遺伝子を取り出し、これを別の羊の卵子に入れて育てて分娩させ、「ドリー」を作った。ドリーは遺伝子を取り出した羊と全く同じ遺伝子を持ち、「クローン羊」と呼ばれた。この技術は家畜や愛玩動物に応用され、クローン動物初の組換えワクチンが承認された

遺伝子組換えの規制

遺伝子組換え技術は１９７３年に開発されたのだが、遺伝子を人工的に改変することについて大きな懸念があり、これを実際に応用する前に、その安全性を十分に確認することになった。これには当時の社会状況も関係している。第二次世界大戦が終わり、世界の経済が急速に成長し、新たな科学技術が次々と誕生し、社会は豊かになったのだが、その陰の部分として大規模な化学物質公害が起こった。また物理学の研究が原爆の開発につながったことが厳しく反省された。このような状況から、新たな科学技術は社会に利益をもたらすだけでなく、環境破壊や社会の混乱などの不利益をもたらす可能性があることが深刻に認識された。そして新たな技術を実用化する前に、それが社会や環境に及ぼす影響を十分に考えておこうという流れが生まれた。

社会の認識と厳しい規制

この考え方に沿って、米国では１９７２年に連邦議会技術評価局（ＯＴＡ：Office of Technology Assessment）が設立され、１９９５年に廃止されるまでに酸性雨、医療、気候変動、ポリグラフ（ウソ発見器）など多くの技術評価を行った。遺伝子組換えについては、１９７５年のアシロマ会議で「遺伝子組換えガイドライン」を採用し、これに基づいて１９７６年に米国国立衛生研究所（ＮＩＨ）が「組換えＤＮＡ実験ガイドライン」を発表し、この技術の応用に厳しい規制が行われることになった。

こうして極めて慎重な形で出発した遺伝子組換えが最初に実用化されたのが１９８０年代だが、ここでは医療分野での利用について述べる。

バイオ医薬品

遺伝子組換えにより作られたタンパク質を含む医薬品が遺伝子組換え医薬品で、一般にバイオ医薬品と呼ばれている。世界で最初に承認されたバイオ医薬品はヒトインスリンで、１９８２年のことだった。

インスリンは膵臓から分泌される血糖降下作用を持つタンパク質で、糖分を摂取すると分泌されて血糖値を下げる。しかし糖分の過剰摂取により分泌量が不足すると糖尿病になる。糖尿病が進むと血液中の過剰な糖分が血管に障害を起こして血流が悪くなり、心筋梗塞、脳梗塞、腎機能障害、網膜症など様々な病態を引き起こし、重症化すると死に至る。

厚労省の１９９７年の調査では糖尿病が強く疑われる人は６９０万人、可能性を否定できない人を含めると１３７０万人と推計された。国民の10人に1人という高い割合である。糖尿病の治療薬として使われるのがインスリンで、血糖値を下げるための医薬品として利用されている。糖尿病ネットワークが２０１３年に行った調査では、インスリン治療を行っている患者は約１００万人である。

トロントの奇跡

２００１年　ヒトゲノムの配列が発表掲載され、世界中の研究者が治療法の開発を始めた

２００１年　米国食品医薬品局ＦＤＡは慢性骨髄性白血病患者のための遺伝子標的薬である「イマチニブ」を承認した

２００４年　日本で遺伝子組換えにより青いバラが作成された

クローン羊のドリー

が作られている。

青いバラ

インスリンとペニシリン

糖尿病が起こる仕組みについては古くから研究が行われ、１８８９年に実験犬の膵臓を摘出すると糖尿病が起こることが分かり、１９１６年には膵臓から糖尿病を抑制する物質が分泌されるのではないかと考えられ、この謎の物質はインスリンと命名されたが、その実態は分からなかった。１９２１年にカナダのバンティング医師が、トロント大学のマクラウド教授の研究室を、教授の８週間の夏季休暇中だけ借りて、大学院生のベストの助けで行ったのが、膵臓の抽出物を糖尿病の犬に投与する実験だった。

バンティング医師とベスト院生は膵臓から有効物質を抽出する様々な方法を試した結果、ついに血糖値を下げる成分を含む抽出物を見つけた。そしてこれを糖尿病患者に注射したところ血糖値が見事に下がった。この発見は「トロントの奇跡」と呼ばれる画期的なもので、発見からわずかに２年後の１９２３年にノーベル生理・医学賞を受賞した。すぐ後の１９２８年にフレミングが抗生物質ペニシリン発見し、１９４５年にノーベル生理・医学賞を受賞したのだが、インスリンとペニシリンの発見は20世紀最大の医学上の功績とされている。

インスリンの発見を報告する論文はバンティング医師とベスト院生の名前で発表されたのだが、ノーベル賞を受賞したのはバンティング医師とマクラウド教授だった。マクラウド教授がこれを自分の発見のように講演や執筆を重ねたため、ノーベル委員会はベスト院生ではなくマクラウド教授を共同受賞者に選ぶという間違いを犯してしまったのだ。バンティング医師は賞金の半分をベスト院生に贈与したという。

本庶佑教授の大発見

この発見でインスリンが糖尿病の特効薬であることが分かったのだが、インスリンはタンパク質であり、これを化学的に合成して大量の医薬品を作ることは困難だった。そこでウシやブタやクジラの膵臓からインスリンを抽出して治療に使ったのだが、その量は十分ではなかった。さらに、動物のインスリンはヒトインスリンと構造が多少違うため、アレルギーやインスリン抵抗性が起こった。このような問題を解決するために遺伝

2004年　国連食糧農業機関FAOは遺伝子組換え作物が発展途上国の貧しい農家や消費者を助けると述べた

2006年　FDAは、ヒトパピローマウイルス（HPV）の遺伝子組換え子宮頸がんワクチン「ガーダシル」を承認した。

2006年　京都大学山中伸弥教授がマウス皮膚細胞からiPS細胞を作成、2012年にノーベル生理学・医学賞を受賞

2018年　中国でゲノム編集を行った双子が誕生、実施した研究者は倫理違反で３年の懲役

2020年　ゲノム編集により作成した機能性成分GABAの含有量を高めたトマトが届出

2020年　数年かかると言われた新型コロナmRNAワクチンが遺伝子操作技術を使って1年で完成し、英国で承認。日本の承認は2021年

子組換えを使って、酵母菌や大腸菌にヒトインスリン遺伝子を組込むことでヒトインスリンを作らせることに成功したのだ。

その後のバイオ医薬品の発展は目覚ましく、多くの種類が承認されている。その一つであるヒト抗ＰＤ－１抗体「オプジーボ」は２０１８年のノーベル生理学・医学賞を受賞した本庶佑京都大学教授が作った難治性のがんに対するバイオ医薬品である。私たちの体内では毎日数千個のがん細胞が生まれているが、免疫細胞がそれらを排除しているのでがんにならない。しかし、もしがん細胞が免疫細胞の攻撃から逃げることができれば、がんが大きくなる。本庶教授が見つけたのは、がん細胞表面のＰＤ－Ｌ１という分子が、免疫細胞であるＴ細胞表面にあるＰＤ－１分子に結合すると、Ｔ細胞ががん細胞を攻撃しなくなることだ。そこでＰＤ－１とＰＤ－Ｌ１の結合を妨害する働きをする抗ＰＤ－１抗体オプジーボが、遺伝子組換えにより作られた。これを悪性黒色腫というがんの患者に投与したところ、Ｔ細胞の攻撃力、すなわち免疫が復活してがんを攻撃した。この画期的な治療法は「がん免疫療法」と呼ばれ、ノーベル賞につながった。

このようにかつては夢であった医薬品が遺伝子組換えを使って現実のものになったのだが、問題もある。その一つは、バイオ医薬品の開発と製造に多額の費用がかかるため、薬価が高額なことだ。例えばオプジーボが保険適用された当初は薬剤費が年間３５００万円とされ、話題になった。その後１０９０万円に値下げされたが、それでも高価であることに間違いない。以前に発売され、すでに特許が切れた医薬品については安価な「ジェネリック医薬品」があるのだが、バイオ医薬品分野でもこれに相当する「バイオシミラー」が販売され、医療費の引き下げ効果が期待されている。

現在日本で承認されているバイオ医薬品は多数に上るが※1、これらを種類別に分けて**表２**に示す。なお、遺伝子組換えで製造されたバイオ医薬品は、「遺伝子組換え」と表示されている。

※1：https://www.nihs.go.jp/dbcb/approved_biologicals.html

再生医療と遺伝子治療

私たちの身体は皮膚、筋肉、骨、内臓、血液など様々な組織で作られているが、これらは最初は１個の細胞（受精卵）だった。この細胞はどんな組織にでも変化する「万能性」を持っているのだが、分裂を続けるうちに万能性を失い、目的の組織だけを作るように「分化」するのだ。だから皮膚の細胞は分裂しても皮膚しか作らない。

山中伸弥教授のｉＰＳ細胞も遺伝子組換え技術

皮膚のように再生できる組織もあるが、脳や心臓のように再生できないものもある。そんなときに人工的に組織を再生するために必要なものが「万能細胞」である。その一つはＥＳ細胞だが、これはヒト受精卵から作るため、倫理上の観点から治療には使えない。そこで京都大学の山中伸弥教授は遺伝子操作技術を使ってヒト皮膚細胞からｉＰＳ細胞という万能細胞を作った。この細胞はどんな組織にでも分化するので、これを使って網膜を再生して視力を取り戻し、脳の細胞を再生してパーキン

２０２０年　ゲノム編集技術を開発したダウドナ博士とシャルパンティエ博士がノーベル化学賞を受賞
２０２１年　ゲノム編集により作成した大きな真鯛と成長が早いトラフグが届出
２０２２年　新型コロナオミクロン株対応ｍＲＮＡワクチンが承認

表２
日本で承認されているバイオ医薬品
（カッコ内は承認された年）

１　酵素

ｔＰＡ（１９９１）：脳血管に詰まった血栓を溶解することで脳梗塞の治療を行う。チャイニーズハムスター卵巣細胞ＣＨＯなどに作らせる。その他、椎間板ヘルニア、ムコ多糖症、糖原病Ⅱ型、がん化学療法に伴う高尿酸血症などの治療薬がある。

２　血液凝固関連因子

血液凝固関連因子の欠損のため出血傾向や血友病になることがある。その治療薬として、血液凝固因子、トロンボモデュリンなどをＣＨＯや酵母などに作らせる。

ソン病を治療するなどが行われている。今後は心臓や腎臓など多くの臓器の再生に利用される可能性がある夢の技術である。

　組織は傷ついていないが、その遺伝子に異常があって、十分に機能を発揮しない遺伝性疾患もある。するとある種のタンパク質が作られないことで病気が起こる。その治療は、患者の細胞を取り出し、これに必要な遺伝子を組込み、患者に戻すことで行われる。あるいは患者の体内にある細胞に必要な遺伝子を直接組込む方法もある。体内でこの遺伝子が働き出すと、今までは作ることができなかったタンパク質が作られて、病気が治るのだ。

iPS細胞の作成技術を確立した山中伸弥教授

がん治療への応用

　遺伝子治療は遺伝性疾患の治療だけでなく、がんの治療にも応用されている。例えば、難治性白血病の遺伝子治療薬であるキムリアは、患者の血液からT細胞を取り出して、これにがん細胞を攻撃するCAR遺伝子を遺伝子組換えにより導入してCAR－T細胞を作る。これを患者の体内に戻すとCAR－T細胞ががん細胞を攻撃するのである。そのほか何種類かの遺伝子治療が行われているが、その現状について日本遺伝子細胞治療学会は「遺伝子治療を受ける患者さんならびにご家族の方々へ」と題して概略次のように述べている※2。

『世界で遺伝子治療の臨床研究が開始されて約30年が経過しました。2019年7月現在、欧州もしくは米国では何種類かが承認に至っており、我が国でも2019年にキムリア（難治性白血病）とコラテジェン（慢性動脈閉塞症）が承認されました。日本ではこの2製品以外はすべて未承認薬であるにもかかわらず、一部の医療機関で未承認薬が患者さんに投与されている事実があり、日本遺伝子細胞治療学会は強い懸念と深い憂慮をいだいております』

　遺伝子治療は大きな可能性を秘めた医療技術であり、海外では承認されているが日本では未承認の遺伝子治療を高額の費用をかけて行うのかは、がん患者にとっては深刻な判断であり、担当医と十分に相談する必要があろう。

※2：https://www.jsgct.jp/public/patient/

遺伝子組換えの社会的受容

　人間の判断の基本は「自己保存の本能」、すなわち、自分の生命と健康を守ることだ。そのために、危険と言われるものを徹底的に避ける性質がある。２番目は、自分に利益があれば、危険と言われるものでも受け入れる性質である。その場合に危険と利益の比較が必要だが、その判断の根拠になるのが実体験と共にメディア情報である。

　実際の例を見ると、遺伝子治療は遺伝子組換え技術を使って私たちの体の細胞を変えてしまうもの

3 血清タンパク質
アルブミン（2007）：血液中のアルブミンが低下すると起る全身のむくみや腹水、胸水、尿量の減少、血圧の低下などの治療薬で、酵母に作らせる。

4 ホルモン
ヒトインスリン（1985）：糖尿病の治療薬で、酵母や大腸菌に作らせる。その他、骨粗しょう症、脂肪萎縮症、低血糖、精子形成の誘導、排卵誘発などの治療薬がある。

5 ワクチン
HPV感染予防ワクチン（2009）：子宮頸がんの予防のためのワクチンで、Hi－5細胞や酵母に作らせる。その他、肝炎ワクチンと帯状疱疹予防ワクチンがある。

6 インターフェロン類
インターフェロンα（1987）：腎がん、多発性骨髄腫、B型肝炎、C型肝炎の治療薬で、NAMALWA細胞に作らせる。その他、インターフェロンβ、γなどがある。

7 エリスロポエチン類
エリスロポエチン（1990）：腎性貧血、未熟児貧血等の治療薬で、CHOに作らせる。その他、エリスロポイエチンアナログ、PEG化エリスロポイエチンがある。

だが、難病の治療に必要である。バイオ医薬品もまた多くの病気の治療に必須の存在である。これらに対して、遺伝子組換えを使っているから危険だとか、廃止すべきなどという意見はほとんどない。糖尿病患者はインスリンのおかげで健康を保っているという個人的な利益を実感し、もしインスリンは遺伝子組換え微生物が作ったものだから嫌だと拒否したら、命を失うかもしれないことを理解している。最初のバイオ医薬品であるヒトインスリンが多くの人の健康を守るという個人の利益を示したため、反対の声がほとんど消えたものと考えられる。

　他方、遺伝子組換え作物については、米国で食用としては未承認の遺伝子組換えトウモロコシであるスターリンクが食用に混入し、これを食べてアレルギーを起こしたという訴訟が続発し、スターリンクの大規模回収が行われ、米国だけでなく世界のトウモロコシ市場が大混乱するという事件が起こった。２０００年のこの事件がきっかけになって、遺伝子組換え作物ががんやアレルギーを起こすなどという非科学的な情報があふれるようになった。もし最初の遺伝子組換え作物が消費者個人にとって利益が実感できるものであったなら、消費者は受け入れただろう。ところが消費者には遺伝子組換え作物の利益が全く見えない。他方、世界の多くの農家が遺伝子組換え作物の栽培を続けているのは、彼らが大きな利益を実感しているからだ。その結果、農家だけが利益を得て、消費者はリスクだけを負わされるという不公平感で、多くの消費者が反対に走ったのだ。

遺伝子組換え作物の「利益情報」が重要に

　安全性の点から言えば、医薬品は生体に明らかな影響を与える強い効果を持つ。その結果、副作用の発現を抑えることはむずかしく、とくにがん治療薬には非常に強い副作用があることはよく知られている。これはバイオ医薬品も例外ではない。他方、遺伝子組換え作物は食品であり、健康被害が出るような物質を含んでいれば即時禁止になる。スターリンク事件でアレルギーを発症したとして訴訟を起こした人たちも、スターリンクが原因ではないことが科学的に証明されている。

　明らかに副作用があるバイオ医薬品が受け入れられ、健康被害がない遺伝子組換え作物が受け入れられないという大きな矛盾を説明できるのは、「個人の利益」しかない。リスク判断に大きな影響を与えるのは「危険情報」だけでなく「利益情報」も極めて重要であることを忘れてはいけないという教訓である。最近始まったゲノム編集食品はこの教訓を生かして、消費者の利益になる商品の開発を優先しているが、その社会的受容に注目したい。

世界に広がる飼料用遺伝子組換えトウモロコシの畑

8 サイトカイン類
GーCSF（１９９１）：造血幹細胞の末梢血への動員、好中球増加促進の治療薬で、大腸菌に作らせる。その他、GーCSF類縁体、mインターロイキンー２、bFGFがある。

9 毒素類
ボツリヌス神経毒素A型（２０２０）：上肢痙縮の治療薬で、ボツリヌス菌に作らせる。その他、ジフテリア毒素＋IL−2がある。

10 抗体
ヒト抗PD−1抗体（２０１４）：根治切除不能な悪性黒色腫の治療薬「オプジーボ」で、CHOに作らせる。その他、数十種類の抗体がある。

11 抗体薬物複合体
カリケアマイシン結合ヒト化抗CD33抗体（２００５）：CD33陽性の急性骨髄性白血病の治療薬で、NS0細胞に作らせる。その他、９種類の抗体薬物複合体がある。

12 融合タンパク質
可溶性TNFRーFc融合タンパク質（２００５）関節リウマチ、若年性特発性関節炎の治療薬で、CHOに作らせる。その他、６種類の融合タンパク質がある。