

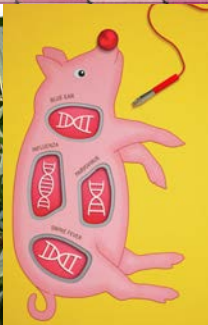
MIT Technology Review

Published by KADOKAWA / ASCII



Food & Agtech

テクノロジーは食卓をどう変えたか



CONTENTS

- 001 世界のチョコ原料の 1%を
100人で生産する工場
- 003 遺伝子編集で作る
「感染症にかからない豚」
- 014 おいしいステーキ肉を巡る
果てしない挑戦
- 017 高すぎる「培養肉」、
植物肉とのブレンドが現実的
- 031 アフリカ農家を救う
ハイブリッド・コーンのイノベーション
- 033 米国のサラダボウルで考えた
農業とアグテックの未来
- 051 わずか数十年で激変した
クルミ農家の収穫風景
- 054 よりよい「塩」で世界を救う
あるインド人研究者の闘い
- 071 停滞するジャガイモの品種改良、
有性生殖で変革に挑む育種家

私たちが日々何気なく口にしてしている食品に、機械工学、生物工学、宇宙工学などの最先端テクノロジーが駆使されていることを知っているだろうか。減少する農業労働力、増え続ける世界人口、水資源の枯渇、気候変動への対処などのさまざまな理由から、食糧生産におけるテクノロジーの活用はかつてない勢いで進んでいる。食とテクノロジーの関係を、さまざまな角度から紹介する記事を集めた。

世界のチョコ原料の 1%を100人で 生産する工場

チョコレート発祥の地であるメキシコでは、世界的な需要の拡大を受け、カカオ加工製品を「ほぼ自動」で生産している。チョコレート原料メーカー大手、イーコム（ECOM）のメキシコ工場長がここ20年間の変化を語った。

我々はコートジボワール、カメルーン、エクアドル、ドミニカ共和国、ペルー、コロンビア、そしてここメキシコからカカオ豆を仕入れている。現在は収穫と収穫の合間なので、来年の豆を買い集めているところだ。来年の生産計画を立てる時には、何トン必要なのかを正確に把握している。

私がここで働き始めたのは、2003年のことだ。当時、我々の生産能力は年間7000トンだったが、現在では年間4万トンのカカオ製品を生産している。2010年にカカオ製品の生産量を大幅に増やし、2016年にはチョコレート・マシュマロやアーモンドなどの一部商品の自社生産も開始した。これは大きな変化だ。メキシコではハーシーやマースなど、さまざまな顧客に向けてカカオ製品を販売しており、競争力が求められる。カカオ製品はコモディティなので生産コストこそ最も重要な要素であり、効率的な生産は非常に重要なのだ。競争力がなければ、市場から去るしかない。イーコム（ECOM）は世界全体のカカオの

約10%を取り扱っており、メキシコ工場だけでも世界全体の約1%を加工している。

当社の施設ではカカオをさまざまに加工をしているが、豆の焙煎、砂糖の粉碎、ココア・バターの溶解、ココアの粉末化、テンパリング（チョコレートを溶かして固める過程での温度調整）、成形、包装など、現在はほとんどが自動化されている。機械は主に欧州製だ。プログラマブル・ロジック・コントローラー・システム（大型機械に指示を出すコンピューター）はドイツのシーメンスのものだが、5年前にはオランダのロイヤル・デュイビス・ウィーナー（Royal Duyvis Wiener）の機械にも約300万ドルを投資した。これが、他社との最大の違いだ。

イーコムが、この工場を稼働させたのは約20年前だ。メキシコ事業を閉鎖したネスレ（Nestlé）から譲り受けた、ほぼ100%手動の古いタイプの機械を使って始まった。現在は、基本的に1つの制御室に2人のオペレーターを配置し、窓か



Mauricio Palos/Bloomberg | Getty

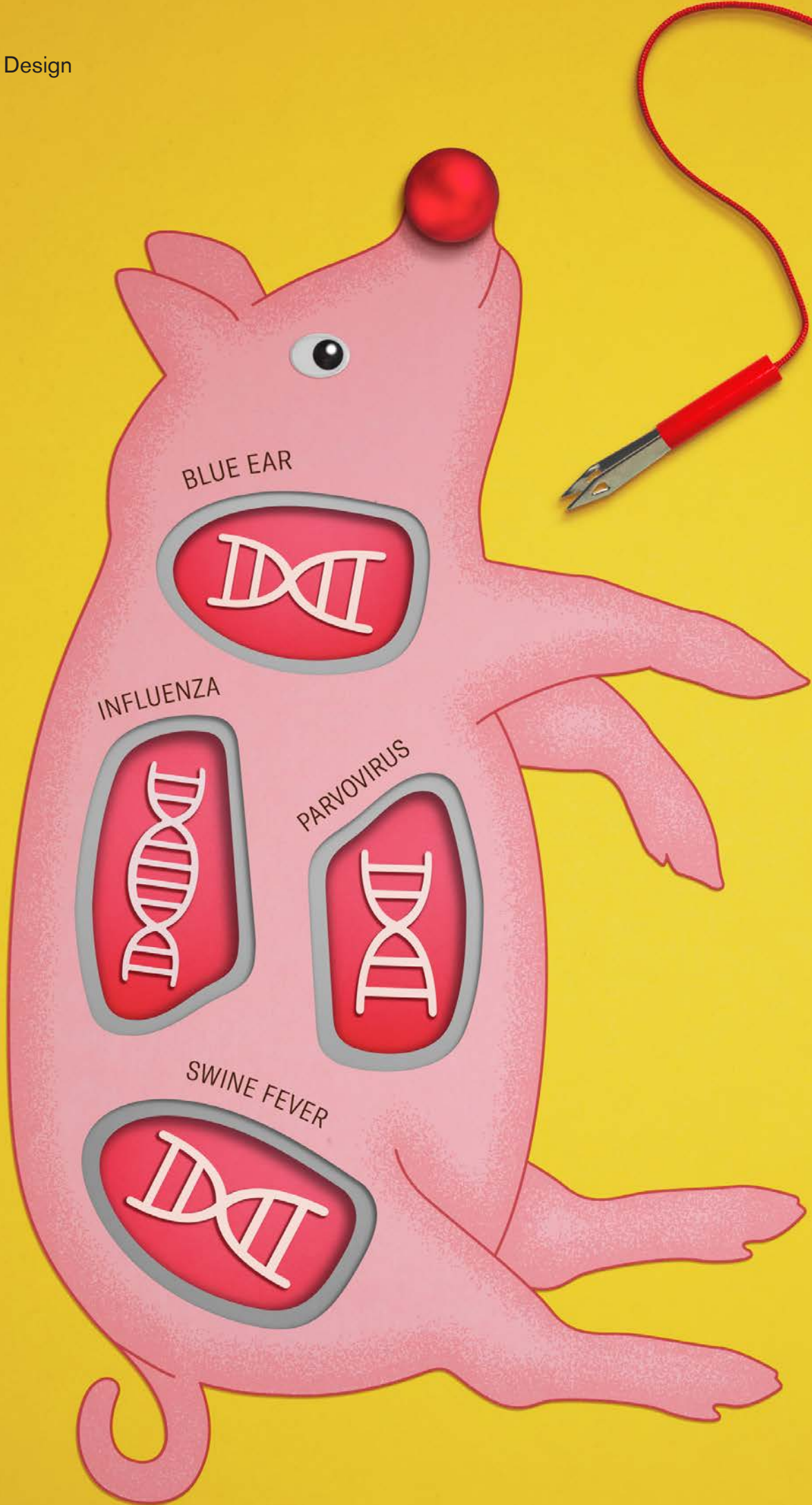
らの目視や制御機器の画面であらゆることを監視しており、工場での作業の約95%はコンピューターが担当している。そのため、人件費も下がり、工場全体の従業員は約100人だ。設備の規模も変わった。例えば、20年前の大型ロースターの容量は半トンだったが、現在は5トンだ。



この記事は、普段お金を支払って口にしている食品が、隠れたイノベーションによってどのように生み出されているかを紹介するシリーズの一部です。クリシカ・ヴァラガーが取材・編集しています。T (Rogelio Rodríguez Soberanes)



イーコム (ECOM) のロヘリオ・ロドリゲス・ソベラネス工場長 (メキシコ/ベラクルス)



BLUE EAR

INFLUENZA

PARVOVIRUS

SWINE FEVER

遺伝子編集で作る 「感染症にかからない豚」

by Antonio Regalado

遺伝子編集技術「CRISPR (クリスパー)」を使って、
感染症にかからない豚を作り出す大規模なプロジェクトが米国で進行している。
理屈の上ではこのプロジェクトの手法は、人間にも適用できる。

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) が世界中で蔓延し始めると、企業は閉鎖に追い込まれ、国は国民に対してステイホームを指示した。多くの人が新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) を止めるにはそれで十分だろうと考えた。しかし、人々が豚にもっと注目していたら、もう少しなんとかなったかもしれない。空中に浮遊して伝播するウイルスの抑制について、テネシー州ヘンダーソンビルにあるピッグ・インブループメント・カンパニー (Pig Improvement Company) のビル・クリスチャンソン COO (最高執行責任者) は、「人々はあたかも自分たちが上手くやっていると勘違いしているように思います」と話す。

クリスチャンソン COO は疫学者と獣医の肩書きを持っている。ピッグ・インブループメント・

カンパニーはエリート繁殖豚を養豚業界に販売しており、過去 34 年間にわたって、豚繁殖・呼吸障害症候群 (PRRS、「パース」と発音する) と呼ばれるウイルス性疾患と闘ってきた。

その病原体が引き起こす病気は、確認しやすい症状の 1 つにちなんで「青耳病」と呼ばれている。PRRS が初めて出現した 1980 年代、この病気は単に「ブタの奇病」と呼ばれていた。PRRS に感染すると、雌豚は流産したり、萎縮した子豚を死産したりする恐れがある。

「豚にとっての PRRS は、間違いなく人間にとっての新型コロナウイルスよりも酷いものです」とクリスチャンソン COO は言う。

PRRS やその他の病気を防ぐために、養豚業者は新型コロナウイルスの予防に努めてきた人なら誰でも知っている対策を採用している。安全な

豚舎に入る人は、その前に体温を測り、シャワーを浴びて、着替えをする。弁当箱には紫外線を浴びせ、物資には消毒剤が噴霧される。次に、「休日に豚を見たか?」、「カントリーフェアに行ったか?」といった「直近の豚との接触」についての質問がある（「はい」と答えると、業務から離れて2週間の隔離を強いられる）。

こういった予防策にもかかわらず、ウイルスは入り込む可能性がある。ウイルスは、侵入するとあっという間に周辺区画に広がる。動物を迅速に「減らすこと」、つまり間引きが、ウイルスを一掃するための最も効果的な方法である。悪い年には、米国の養豚業者は PRRS で6億ドルの損害を被る。

現在、英国の動物遺伝子企業であるジーナス (Genus) の一部門になったピッグ・インブループメント・カンパニーは、別の試みに取り組んでいる。動物を周囲の環境から封じ込める代わりに、豚自体を変えようとしているのだ。同社は、米国中部の実験施設（セキュリティ上の理由から所在地は秘密にされている）に、豚の IVF（体外受

精）センターと研究所を構えて、革新的な遺伝子の「ハサミ」であるクリスパー (CRISPR) を使って豚の卵子の遺伝子編集をしている。

同社のバーチャルツアーでは、1人の社員がスマホを手にして、遺伝子編集ラボを通して、雌豚が出産までの9か月を過ごす妊娠エリアを見せてくれた。このエリアは養豚業界の用語で「ファロウイング（豚の分娩室）」と呼ばれている。次に、案内してくれたコンクリートの部屋では、遺伝子編集された子豚が鳴き、カメラをのぞき込んできた。同社によると、これらの幼豚は、PRRSのウイルスが結合する分子受容体をもはや持っていないため、PRRSに感染しないという。

すべてのウイルスは、細胞に結合し、自身の遺伝物質を注入することによって細胞を攻撃する。新型コロナウイルスの場合は、気道や肺の細胞によく見られる ACE-2 と呼ばれる受容体に付着する。新型コロナウイルス感染症が呼吸に問題を引き起こすのはそのせいだ。PRRS の場合は白血球の受容体である CD163 に付着する。前述の実験用の豚は、遺伝子編集によって CD163 の一部

が切り取られており、CD163 の完全な遺伝子を持っていない。ウイルスの受容体がなければ、感染もしないということだ。

「私はそれが正解であろうとは思っていませんでした。しかし、あらゆる豚種ですべてのウイルス株に対して有効なようです」——ビル・クリスチャンソン

ピッグ・インブループメント・カンパニーの未発表研究によると、遺伝子編集された豚に PRRS を感染させる試みは成功していない。「私はそれが正解であろうとは思っていませんでした。しかし、あらゆる豚種ですべてのウイルス株に対して有効なようです」と、クリスチャンソン COO は話す。

同様の方法が人間に対して試みられたことは悪名高い。2018 年に発覚したどうしようもなく無謀な試みで、中国の科学者たちはエイズの原因である HIV への耐性を与えようとして、人間の胚を編集した。研究者たちは、豚の場合と同じように、受容体を取り除くことによって病気を阻止す

ることを夢見たのだ。問題は、テクノロジーがそのような野心的な研究を安全に実行できる水準にはなかったことだった。クリスパーツールは非常に用途が広いが、精度が不十分であり、DNA に手を加えたせいで、この実験から生まれた双子には遺伝子の傷のようなものが作られた。

その年の 9 月、権威ある国際委員会は、「人間の胚に望ましくない変化を起こすことがなく、効率的かつ確実に正確なゲノム変異を起こすことが可能であることが明確に確立されるまで」、何人たりとも二度と胎児の遺伝子改変を試みるべきではないと発表した。

しかし豚の場合、今こそが遺伝子改変の時代であり、そのメリットは間もなく明らかになるかもしれない。ジーナスは、早ければ 2025 年にも、米国と中国で自社の豚を販売する認可を獲得できるだろうと見ている。すでに、同社の実験場では、数百頭の遺伝子編集された豚が生まれ、その子孫は数千頭にのぼる。これはおそらく世界最大規模であろう

PRRS 耐性を持つ最初の動物の開発に携わったイリノイ大学の研究者、レイモンド・ローランド教授にとって遺伝子編集は、豚とその飼育者にとって「最も広い意味で、より理想的な生活を創造する方法」である。「豚がウイルスに感染しなくなります。ワクチンはありません。診断テストも不要です。遺伝子編集ですべてが解決します」と同教授は言う。

エリート豚

オルダス・ハクスリーのディストピア小説『すばらしい新世界 (原題「Brave New World」)』は、「中央ロンドン孵化・条件づけセンター」のツアーから始まる。そこでは、「コミュニティ、アイデンティティ、スタビリティ」と書かれた看板の下で、将来の社会を担う子どもたちが試験管のプロセスを経て作られている。一方、ジーナスの実験施設の看板は主に体温チェックや手洗に関するものであるが、コンセプトはそれほど変わらない。すべての豚は、番号が付けられ、監視され、遺伝

的性質について DNA 検査されている。

ジーナスは、最も健康的で、最も成長が速く、最も大きな子を産むよう選別された動物を管理している。ジーナス曰く「エリート遺伝資源」であるこれらの動物は、「マルチプレイヤー・ファーム」での交配を通じて繁殖され、アイオワ州から北京に至るあらゆる地域の生産者に購入され、購入した生産者はさらに繁殖を進める。

同社は数年前から DNA シーケンシングを使って、好ましい形質を持つ豚を特定し、繁殖プログラムのかじ取りをしてきた。2015年には、カリフォルニア大学バークレー校のジェニファー・ダウドナ教授が創業したカリブー・バイオサイエンス (Caribou Biosciences) のテクノロジーを使って、豚や牛の遺伝子編集をする独占ライセンスの契約を締結した。ダウドナ教授は、2020年10月にクリスパーの開発でノーベル賞を共同受賞している。

ジーナスには遺伝子工学の経験がなかったため、植物生物学者を雇い始めた。そのうちの1人で、同社のCSO (最高科学責任者) を務めるエ

Gene editing has made pigs immune to a deadly epidemic



レナ・ライス博士は、バイオ化学メーカーのモンサントに18年在籍し、大きく成長して干ばつに耐え得る遺伝子組み換えトウモロコシを主に開発していたロシア生まれの遺伝学者である。「植物は決して感情に訴えるものではありませんでした。小さな豚や牛はとても感情に訴えます。抱きしめたくなり、彼らが健康であることを望みます。まるで子どもがいるようなものです。病気になってほしくないのです」とライスCSOは言う。

ジーナスの研究場では、遺伝子編集プロセスを多くの豚に迅速に実行できるようになっている。雌豚は麻酔をかけられてから処置室に運ばれ、獣医師によって卵巣から卵子を取り出される。卵子はラボに移され、そこで受精され、クリスパー分

子が投入される。編集の2日後には、数個の細胞の大きさに成長した胚が、代理出産をする雌豚に移植される。

クリスパーは、予め決められた場所でDNAを切断できることで知られているが、実際のところはランダムな要素がある。ゲノム内の1カ所に狙いを定めても、複数の方法でそれを変更できる。予定外の変更である「オフターゲット」が、ゲノム内の遠い場所で現れる可能性もある。

植物では、このランダム性はそれほど問題ではない。単一の種子への遺伝子変更が成功（植物エンジニアはそれを「イベント」と呼ぶ）したら、かなり短期間に百万倍に増やすことができるからだ。豚では、繁殖用の種豚の個体数を確保するた

めに、多くの動物で同じ編集をする必要がある。

ブタ細胞での実験において、ジーナスの研究者は CD163 遺伝子に可能な多くの編集を試み、最も予測通りの結果が起こるものを探した。そのような努力をしても、生まれてきた豚で、正しく遺伝子編集されていたのは約 20% から 30% にすぎない。ゲノムにエラーがある子豚は最終的に堆肥の山になる。「このテクノロジーは単純ではないことを伝えたいです。上手くいくこともあれば、そうでないときもあります。すべての豚に予測可能な変化を望むには、綿密である必要があります。毎回同じ変化である必要があるのです」と、このプログラムで上級職を務める分子生物学者のマーク・シガン博士は話す。

インフルエンザの撲滅

PRRS が米国で大きな問題となっている一方で、ジーナスや他の企業は、豚が他のウイルスにも感染しないようにできると考えている。遺伝子編集によってアフリカ豚熱にかからない豚を作れ

るかどうかを調査している企業もある。アフリカ豚熱は中国で蔓延している病気で、2018 年以降、中国の豚の半分が失われている。ローランド教授をはじめとする研究者たちは、遺伝子編集された豚には、特定のウイルスが豚から人間に波及する可能性を下げるといふ、間接的なメリットも存在する可能性があるという。

新型コロナウイルスの発生源はまだ解明されていないが、この病気は人獣共通感染症であり、動物から人へ感染したというのが有力な説となっている。豚は新型コロナウイルスに感染しないので、おそらくその出現には何の関わりもないだろう。しかし、養豚場はインフルエンザのパンデミックの発端としてよく知られている。豚は、豚インフルエンザに加えて、鳥インフルエンザとヒトインフルエンザの両方にかかる可能性がある。これにより、養豚場はインフルエンザウイルスが DNA の並びを交換できる危険なかくはん容器になる。

このような遺伝子パーツ再集合は、免疫を持たない人々の間で広がる新しいインフルエンザウイルスを突然発生させる可能性がある。2009 年

の H1N1 型豚インフルエンザは、鳥、豚、人間に由来するウイルス要素を持っていた。米国では約 6100 万人が感染し、約 30 万人が入院して、1 万 2500 人ほどが命を落とした。大勢が命を落とした 1918 年のインフルエンザ・パンデミックの際には、米国では「豚インフルエンザ」の流行も伴った。だが、それらの間の関係性は証明されていない。

ジーナスは 2020 年から、カンザス州立大学の科学者ユルゲン・リヒト教授と契約して、インフルエンザに耐性のある豚づくりを進めている。リヒト教授は、急速に進化するインフルエンザウイルスに対して、豚に完全な免疫を持たせられるかどうか定かではないが、病原体の活動を遅らせて、おそらく別のパンデミックの可能性を十分下げられるようになるだろうと考えている。「ウイルスの複製が少なければ、変異も再集合も少なくなります」と同教授は言う。そうなれば、最終的にウイルスの進化を食い止められる。

インフルエンザウイルスが付着する受容体は体内で非常に一般的であるため、動物はそれらを取

り除くと生きることができないとリヒト教授は話す。そのため、このプロジェクトでは、受容体の代わりに、インフルエンザウイルス（さらには新型コロナウイルス）が細胞に効果的に侵入するためのヘルパー分子として利用している、プロテアーゼというタンパク質の遺伝子を取り除くことを目指している。インフルエンザには多くの種類があるため、複数のプロテアーゼを取り除く必要があるが、そうすると、取り除かれた遺伝子が多い豚が発育できるかという疑問が生じる。豚をジェンガタワーに例えるなら、タワーが崩れ落ちるまでに、いくつのブロックを取り除くことができるのかということだ。

「遺伝子をどこまで取り除けるのかは、分かりません。それが試行錯誤を繰り返す理由です。なんとしてでも、すべてのすべてのインフルエンザに対する耐性を持たせたいのです」とリヒト教授は語る。

受容体が 1 つだけ除去された PRRS への耐性を持つ豚が健康、あるいは正常であるかどうかはまだ明らかではない。シガン博士の話では、ジ

ナスは豚が健康で正常であると考えている。研究者たちは、豚がどれだけ食べて、どれだけ体重が増えるかなどを測定するテストで、これといった違いは確認できていない。しかし、予定外の変化が潜行している可能性もある。

リヒト教授は10年前に、牛海綿状脳症（BSE、いわゆる「狂牛病」）に耐性のある牛づくりに関わったとき、1つの遺伝子を取り除いた後、異変を感じたという。「牛の立ち上がり方が奇妙でした。再び立ち上がるのが困難でした。世話係はこの牛たちはバカだと言っていたので、おそらく知能が影響を受けたのでしょう」と同教授は話す。12頭の牛しかいなかったのが確信が持てなかったが、牛が生存に不可欠ではないものの、除去すると感覚系の劣化につながる「ぜいたく機能」を失ったのではないかと考えている。

ペスト

豚は解剖学的に人間に非常に似ている。医者はいつか豚の腎臓を人間に移植できるようになるこ

とを期待するほどである。豚で遺伝子編集が完璧に実施された場合、人間にとってどういう意味があるのだろうか。往々にして、人間の遺伝子改変についての議論は、たとえば、子どもの目の色や知性を変えることが道徳的であるかどうかという質問に帰結してきた。しかし、ジーナスは、クリスパーによって人間が遭遇する可能性のある最悪の感染症に対して、生まれつきの「遺伝子ワクチン」を与えられる可能性を示している。

HIVへの耐性を得るために人間の胚の遺伝子を編集した中国の科学者たちは、まさにそのような革命的な発展を追求していた。そして、彼らが遭遇した問題は、ジーナスが直面している問題と似ていた。実施した遺伝子編集を正確に制御できず、CCR5と呼ばれる1つの遺伝子の発現を阻止することで、予期しない結果が生じないという確信がなかった。ただし、その実験に2回目はなかった。さらに、治療薬によって何十年にもわたってHIVの発症を抑制できているのに、この危険な試みが医学的に必要かどうかを多くの人が疑問視した。

豚は解剖学的に人間に非常に似ているため、医者はいつか豚の腎臓を人間に移植できるようになることを期待するほどである。その豚で遺伝子編集が完璧に実施された場合、人間にとってどういう意味があるのだろうか。

中国における失敗以来、米英の科学アカデミーは、遺伝子編集が人間の生殖に利用するのに十分安全であっても、いかなる種類の「強化」も避け、代わりに鎌状赤血球症のような遺伝性疾患を子どもに受け継ぐことを防ぐなど、より狭い目標をとるべきであると述べてきた。

それでも、将来のパンデミックに対する可能な防御策として、このテクノロジーを使いこなすことが重要であると考える人もいる。ワクチンや治療薬では制御できず、免疫が形成されないとつもない病気に社会が襲われた場合、次世代の人間から受容体を取り除くことは、文明の頼みの綱となる可能性がある。

ハーバード大学医学部の学部長を務めるジョージ・デイリー教授は、2018年に香港で開かれた

国際会議で、聴衆に向かって、「私たちは種として、将来の脅威に直面しても、自分たちの遺伝をコントロールできるよう、柔軟性を維持する必要があります」と述べた。人間を改変する手法を開発する一つの理由として、同教授は「パンデミックに対する抵抗」を挙げた。

今回の新型コロナウイルス感染症の蔓延は、新しい病原体がどこからともなく爆発し、世界中に広がる可能性があることを示している。新型コロナウイルス感染症による全体的な死亡率はおそらく0.5%程度であり、人類の存在が脅かされることはない。しかし、次のパンデミックが、中世ヨーロッパで人口の3分の1以上を死に追いやったペストのようなものだとしたらどうであろうか。小惑星の衝突のように、可能性はわずかであろう。しかし、特定の病原体に抵抗するように人間を設計できるようにすることは、持っておく価値のある、いざというときのためのテクノロジーかもしれない。

ジーナスの科学者たちは、動物の遺伝子編集で

分かっていることから、人間の遺伝子編集は未来的には不可能ではないと考えている。20年前なら、ライス CSO はそれが純粋なフィクションだと言っていたであろう。「しかし今、私たちは実際に動物の遺伝子編集をしています。私たちにはその手段があるのです」と同 CSO は言う。▶

**eムックは、MITテクノロジーレビュー
有料会員限定サービスです。**

**有料会員はすべてのページ（残り63ページ）を
ダウンロードできます。**

ご購入はこちら



<https://www.technologyreview.jp/insider/pricing/>

No part of this issue may be produced by any mechanical, photographic or electronic process, or in the form of a phonographic recording, nor may it be stored in a retrieval system, transmitted or otherwise copied for public or private use without written permission of KADOKAWA CORPORATION.

本書のいかなる部分も、法令または利用規約に定めのある場合あるいは株式会社 KADOKAWA の書面による許可がある場合を除いて、電子的、光学的、機械的処理によって、あるいは口述記録の形態によっても、製品にしたり、公衆向けか個人用かに関わらず送信したり複製したりすることはできません。