

市民が農業分野の遺伝子関連技術について話し合うときに拠り所となる
知識のミニマムセット

対話のための遺伝子リテラシー

分子ロボット倫理研究会



目次

| | | |
|-------------------------------|----------------------|----|
| はじめに | く分かりやすさの罫 | 3 |
| 農業分野における遺伝子関連技術を俯瞰するための情報共有資料 | | 10 |
| 循環共生圏農工業 | く分子ロボットを活用した農業 | 66 |
| おわりに | くできる限り正確な技術情報に基づく議論を | 69 |

はじめに
く分かりやすさの罨く

北海道大学客員准教授 吉田 省子



●分子ロボット倫理研究会とは

「分子ロボット倫理研究会」は分子ロボット倫理に関心を持つ研究者の集まりです。分子ロボット研究者からELSI(倫理的、法的、社会的課題)研究者まで多様な参加者で構成されていて、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)のプロジェクト研究「分子ロボットELSI研究とリアルタイム技術アセスメント研究の共創」(2017~2020)に端を発しています。

同研究会は、持続可能な未来を実現するために、化学肥料や農薬に頼らない循環農工業の展開を構想していて、その鍵となる技術が分子ロボット技術というわけです。同研究会は、上記プロジェクトによる「分子ロボット技術倫理綱領第1.2版」(注1)の次段階として、「分子ロボット基礎研究ガイドライン」の作成を進めています。

●市民との「分子ロボット対話」

同会は、分子ロボットの農業利用を念頭に置いていますので、研究の上流部分で市民や農業者との対話が必要であるとも認識しています。特に、研究構想を耳にした農業者はどのように反応するだろうかと気になっています。

そこで、同研究会は新型コロナのパンデミック下の2020年3月に対話に向けた準備を始め、8月から2021年2月にかけて市民、農業者そして科学館の方たちを対象とした「分子ロボット対話」を実施しました。これらの対話は科学コミュニケーション研究所のオンライン対話モデルに準拠して行われ、『分子ロボットをめぐる対話要点集』(注2)と『「分子ロボットをめぐる市民対話」に基づく「ELSI論点モデル」の構築』(注3)に結実しています。

対話の目的は、情報提供と意見交換を通して研究者が参加者の反応に直に触れ、研究にフィードバックすることでした。中でも、農業者との対話に関して言えば、自己増殖する分子ロボットは農業者に許してもらえるか否かの感触を得たというものでした。第3回「農業技術のなかで分子ロボット技術を俯瞰する対

話」では、主催側による農業技術の指定は一切なく、農業者の発話に委ねられた対話の場は実り豊かでした。とはいえ、遺伝子組み換えやゲノム編集などの技術の詳細はブラックボックスの扱いでした。

それから1年、同研究会は2022年1月に「農業分野における遺伝子関連技術を俯瞰して、受け入れやすさ・受け入れにくさを考えるワークショップ」を実施しました。すんなり実現したわけではありません。分子ロボットについてのさまざまな論点はそれまでの対話ですでに十分得ているので、新たな農業者対話を行う意味はあるのかと悩むことになりました。

開催するとすれば、その目的は何か。目的達成のための情報提供資料はどのようなものであれば良いのか、と。

●イラストを見て何を理解しているのか

情報提供資料のあり方はどのようなにあるべきなのでしょう。インターネットなどで検索すると、遺伝子組み換え作物やゲノム編集動植物の説明で使われている「こんな仕組みですよ」というイラストが多数出てきます。私たちはこのイラストを見て何を理解しているのでしょうか。

専門家ではない者が、微視的レベルで起きている現象を専門家のように正しく理解することは困難です。一連のメカニズムに関する詳細な説明は、その専門的概念を駆使する専門家の領域において機能することであって、その分野の専門知識のない私たちにとっては理解を助けるどころか、場合によっては理解しようという気力を失わせるかもしれません。

故に、専門知識のない私たちにとっては、専門家がきちんと関与しながら描かれたであろう絵解きのイラストが最適解となるのでしょうか。

しかし、本当にそうでしょうか？

とても気になります。それは、そのイラストはメカニズムを十分に説明できていないのではないかと不安、言い換えれば、私たちは何を認識させられているのだろうかというモヤモヤとした感覚です。この感覚は、対話の場などで専門家がDNAやRNAの働きを具体的に語り始めた途端、「先生、専門用語は一般人には難しすぎますよ」と介入し、ふんわりとした語りを専門家にやんわりと強いることと背中合わせの感覚です。やさしく語る。平易に語る。日常の言葉を用以て語る。大事なことです。時折、一般の人を軽んじているのではないかと思うことがあるのです。

●人々が自発的に考え始める「何か」はないか

2011年秋の北海道大学で、遺伝子組み換え作物が栽培されるようになる場合があるという想定で、どのような機能を持った作物なら許されるか、どんな条件であれば栽培して良いかを考えるという、いわば思考実験が行われました。それは、討論者を全道対象の無作為抽出で選び、市民陪審の手法で2日ばかりで行う「GMどうみん議会」というイベントです。その際に、専門家が準備する情報提供資料とは別に、あらかじめ討論者に読んでおいてもらう基礎資料が生物学者や農学者の方たちの支援を得て作成されました。

その基礎資料は一定の役割を果たしたと言えますが、サイエンスの部分の扱いが妥当だったのだろうか、今なお思う時があります。サイエンスそのものを述べる資料として作成したものではないので、サイエンスの潜ませ方のさじ加減が難しかったです。

他から拝借した組み換えの仕組みのイラストは最適のものだったと思っていますが、メカニズムとされるもののさらなる背後のシステムがブラックボックスのままであって良いものなのだろうか、とも思ったわけです。一般市民に対し、選抜、交雑、自然／人為的突然変異、遺伝子組み換えの差異や同一性などを一本の筋道で説明するのは可能か否か、と考え込んだわけです。

このイベント直後にゲノム編集技術が耳に届くようになり、2013年頃からゲノム編集を含む学習会を催すことになりましたが、この感覚は私の中で澱のように沈殿し、幾度となく攪乱され続けていました。どうやれば全体として見通せるサイエンス部分の説明資料が可能になるのか、まるで分からなかったのです。科学者の説明スライドに頼るしかありませんが、それは科学者にとっても難題に見えました。

後知恵で言うなら、遺伝子に言及する必要がある農業分野の諸技術において、DNAを構成する四つのヌクレオチド（A、T、G、C）とRNAを構成する四つのヌクレオチド（A、U、G、C）の動きを模式的に見せることができれば、より微視的になるとはいえ、逆にイラストが示す農業技術のメカニズムを納得できるようにつなげることができないのではないかと、という考え方です。専門家と同じレベルでの概念を駆使した理解を促すのは確かに無理だけれど、もう少し人々に考えてもらえるような「何か」はないだろうか、当時はいろいろとモヤモヤしながら考えていました。

● 知ったからといって仲間になるわけではない

私は分子ロボット倫理研究グループに参加し、農業者との対話に加わるようになって、かつて出会った消費者活動をしている女性たちの一連の言葉が蘇るようになりました。

「私たちは知らないのです。知りたいから学びたいのです。」

説明図を見て分かった気にはなりますが、

本質のところは分からないのです。

だから知りたいのです」

こんな学びを希求する声が聞こえてくると同時に、「知ったからといって知っている側の仲間になるわけでもないのです」という言葉も付け加えられています。

私は、分子ロボット開発を含む諸技術がもたらす何ものかを人々とともに考えていくなら、育種の微視的レベルでの仕組みについてふわっとした物語以外のものが必要だと思うようになっていました。ちょうど、そのような頃合いに、研究グループの小長谷明彦さん（東京工業大学名誉教授・恵泉女学園大学客員教授）が、農業者が遺伝子組み換え技術やゲノム編集技術、そして分子ロボットの技術についてどのようにイメージしているかについて、第4回目の農業者対話を行いたいと提案しました。前述のように、第3回「農業技術のなかで分子ロボットを俯瞰する対話」で大まかな論点は出されていきましたので、科学コミュニケーション研究所と小長谷さんと私とで話し合い、農業者と一般市民の参加を得て、その方たちが農業技術のメカニズムのブラックボックスを覗いた上で対話を行ってみようとなったのです。

具体的には、ヌクレオチドの並び方の変化をレゴやブロックで表現し、人工的な交雑や人工的な突然変異、遺伝子組み換え、ゲノム編集においてゲノムはどのような並びをするのだろうか、そのゲノムの並びの変化の違いを眺めるといふアプローチです。この科学コミュニケーション研究所の提案は受け入れられ、当日は、小長谷さんが少し風変わりな資料を用いて、ゲノムの並びに注目した説明をしました。その後で分子ロボットの農業利用という話題を提示し、遺伝子を用いた改善はどこまで許されるのかと参加者に問いました。

この報告書は、農業分野における遺伝子に関連する技術についての市民的論点の整理を意識しつつ、新しいアプローチについての資料を掲載しています。お読みになった皆様からのご意見をぜひ賜りたく存じます。

注1 <https://molecular-robot-ethics.org/jp/wp-content/uploads/1424033dd58f3a4e6188e4e079ac0b70.pdf>

注2 https://cbi-society.org/home/documents/eBook/ebook4_MolRobo2020.pdf

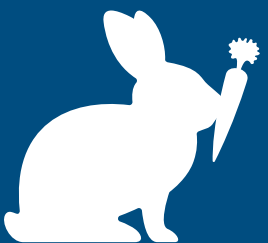
注3 <https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/87647/>

●この資料の目的

この資料では、専門家でない一般のみなさんが遺伝子に関連するさまざまな技術について自ら考え、誰かと話をするときに役に立つ知識を整理しました。資料の目的は、遺伝子関連技術を推進するためでも、反対するためでもありません。できる限り中立的な立場で情報を共有し、今の社会の中で遺伝子関連技術をどう受け止め、取り扱っていくかを考え、より深く、より広く対話できるようにする。これがこの資料の目的です。

実際に遺伝子関連技術を社会に導入するには、技術面だけでなく、さまざまな社会的な側面を考えることも重要になるでしょう。しかし、この資料では、社会制度や経済的な利害関係、歴史的な経緯などはいったんカッコに入れて（検討項目の主役にせず脇に置いて）、技術的な側面にのみ焦点を当てます。遺伝子関連技術を包括的に考え、対話するためです。別に社会的な側面についての知識を補う必要がありますが、まずは遺伝子関連技術についてその全体像を把握いただきたいと思えます。

農業分野における遺伝子関連技術を俯瞰するための
情報共有資料



【起】 遺伝子とは？

～体のタンパク質を作り出す仕組み～

●生物の階層構造

遺伝子関連技術を俯瞰する準備として、まず生物を「科学」という見方で眺めたとき、どのように捉えられるかをお話したいと思います。

「科学」で一匹一匹の動物や一本一本の植物の内部を見ると、ある構造と機能をもったまとまり（器官系）を見いだせます。さらに、その器官系はいくつかの「器官」に、その「器官」は「組織」に、その「組織」は無数の「細胞」から構成されています。

この細胞は、独立して機能する生命の基本単位と考えられています（細胞をもたないウイルスは生物でないと考える立場もあります）。また細胞は、膜によって外の世界と区別され、その内部にはいくつもの「細胞小器官」があり、それらはタンパク質や核酸（DNAやRNAなど）、糖（炭水化物）、脂質などの生体分子から出来上がっています。

このように、いくつかの要素が集まってまとまりを作り、そのまとまりが一つの要素となって、より大きなまとまりを作る構造は「階層構造」と呼ばれます。左図のように、生物を科学の目で見ると、階層構造をもつシステムとして理解できます。

個体
ヒト

器官系
消化器系、呼吸器系、神経系…

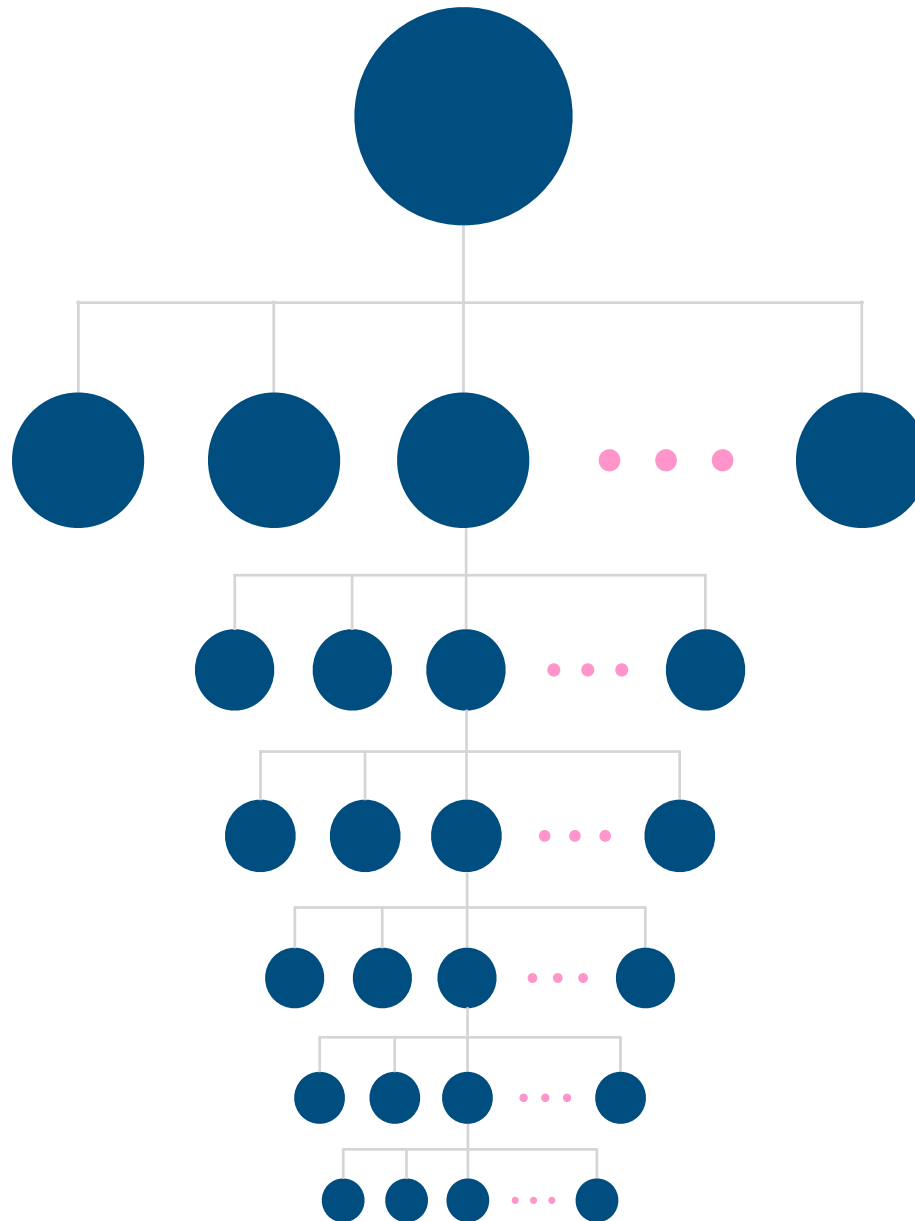
器官
胃、肺、脳…

組織
上皮組織、結合組織、筋組織…

細胞
神経細胞、毛母細胞、卵細胞…

細胞小器官
小胞体、ゴルジ装置、ミトコンドリア…

生体分子
タンパク質、核酸 (DNA、RNA) …

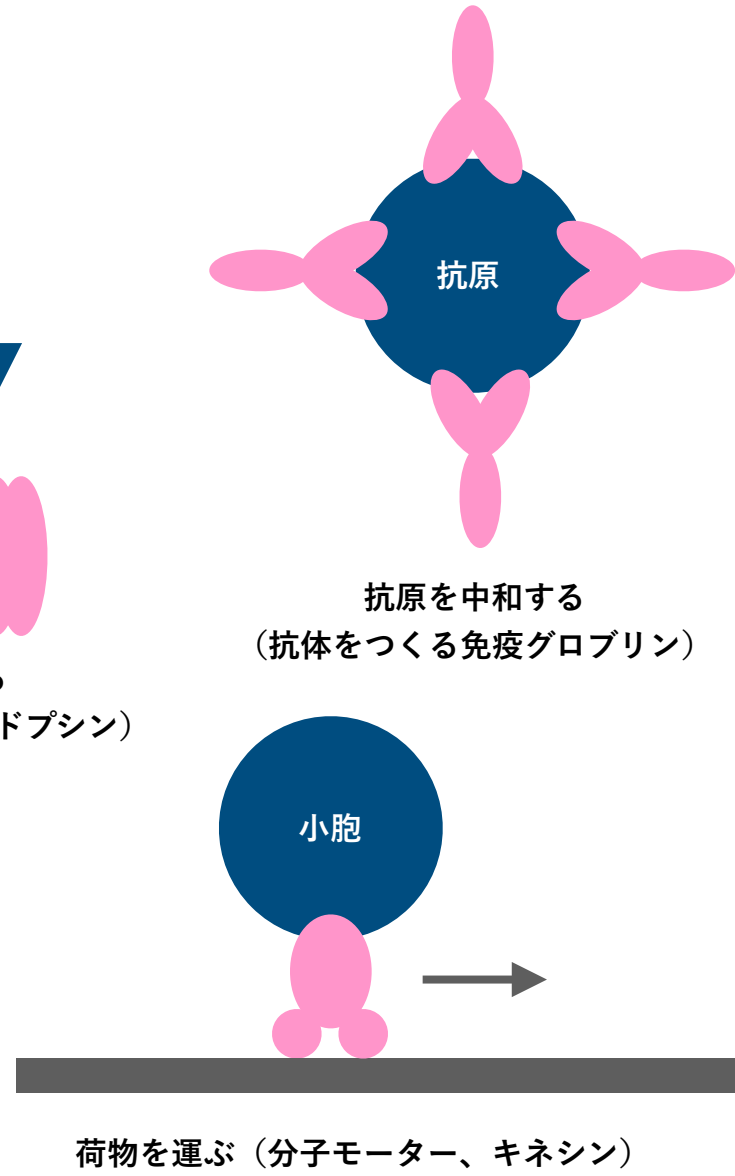
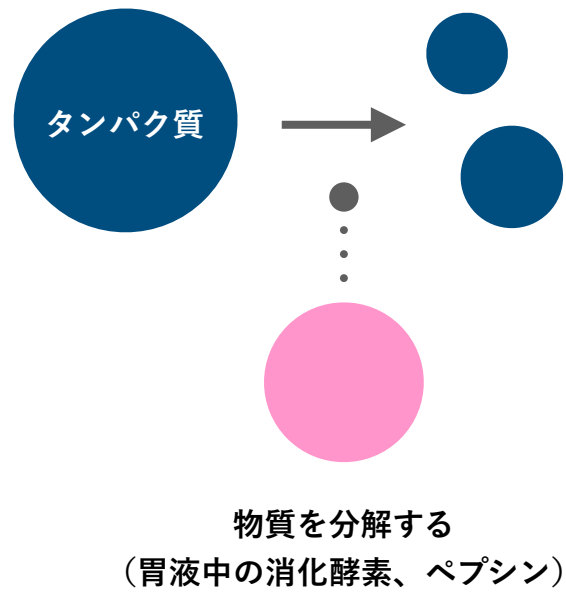
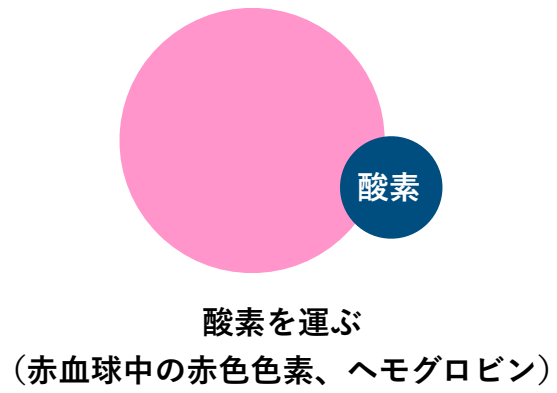


●体はタンパク質で作られている

ヒトを含む生き物の体を「科学」という見方で見ると、そこには生物の階層構造があります。そして、その階層構造の一番下のところは「生体分子」があります。だから、私たちの体は「生体分子」で出来上がっているとも言えるでしょう。また、それが集まって階層的に積み上げられ、一つのものとして働くことによって「生命」が維持されるとも言えます。

この生体分子は1種類ではありません。いろいろなものがあります。その中に「タンパク質」という生体分子があり、これが生物の形や働きのほとんどすべてにかかわっています。

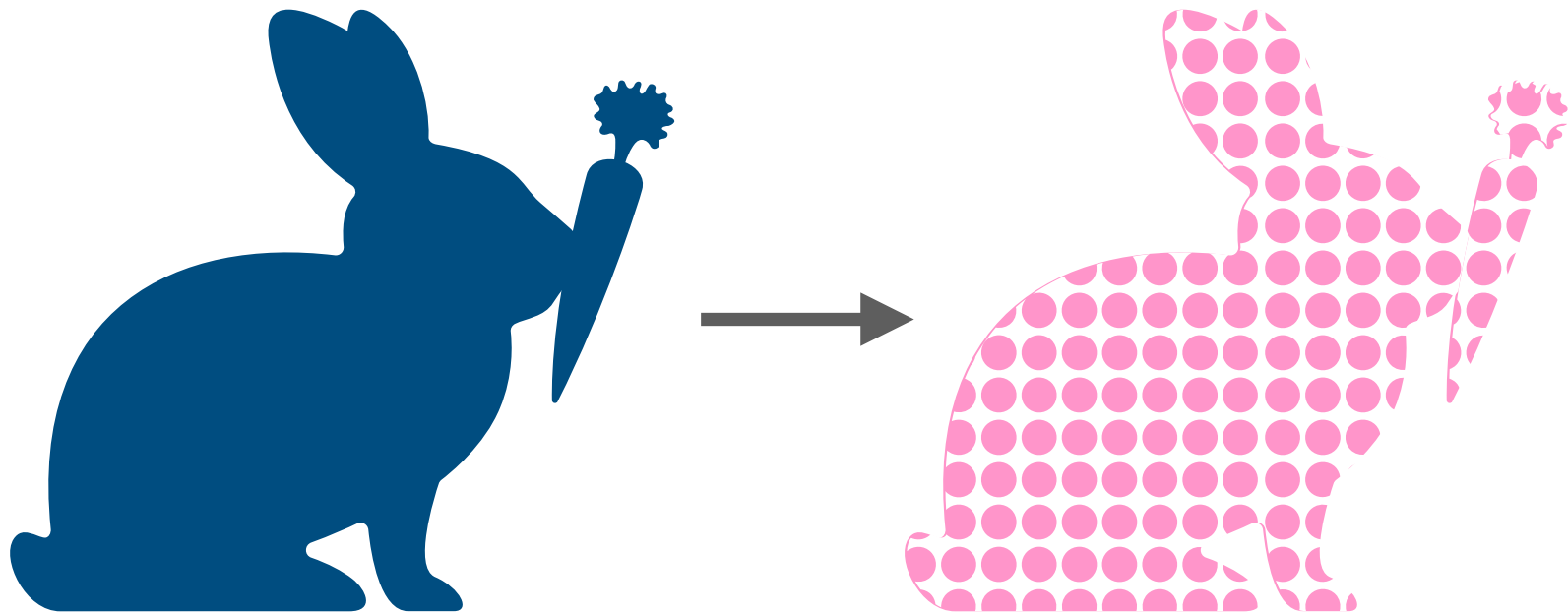
例えば、新型コロナウイルスに関連して耳にするようになった「抗体」も、タンパク質という生体分子から出来上がっています。あるいは、食べ物を分解して体に取り入れられる栄養素にする「消化酵素」もタンパク質から作られています。心臓などの器官も、生体分子で作られた細胞小器官や細胞が組織を作り、その組織が集まって出来上がったものです。



●生物はタンパク質のシステム

生物は、いわば無数のタンパク質から構成されるシステムであると言ふことができます。海の生き物も陸の生き物も、動物も植物も、ほ乳類も、鳥類も、は虫類も、両生類も、魚類も、昆虫も、細菌も、そしてヒトも、それぞれがそれぞれのタンパク質のシステムをもっていると言えます。

私たち生物は食べ物を摂取して命をつなぎます。その食べ物も、ほとんどが生物由来のものです。だから、タンパク質のシステムである私たちは、別のタンパク質のシステムをいただくことで生き続けているとも言えます。植物は、その種のタンパク質のシステムをもち、根から栄養を吸い上げたり、葉で光合成をしたりして、成長して実を付けるなどします。その実や葉は、別のタンパク質システムの草食動物に食べられ、その草食動物は肉食動物に食べられます。そして、植物も動物も、生命を維持できなくなれば、その遺骸が土壤生物（これも独自のタンパク質システム）などに食べられ、その排せつ物などが植物の栄養になります。

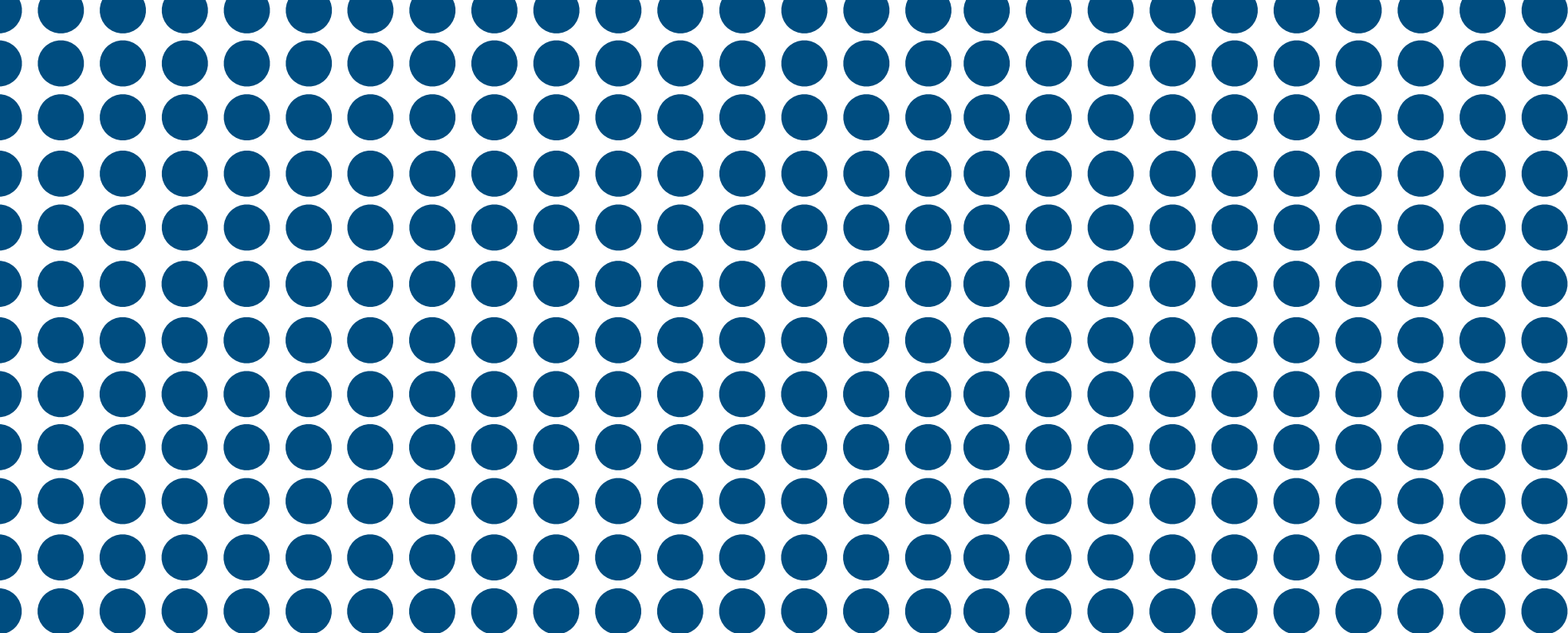


● わずか20種類の組み合わせ

私たちの体の皮膚も心臓も、脳も、タンパク質という生体分子から出来上がっています。このタンパク質にはいろいろな種類があり、生物の体にとって必要なものをさまざまに作り出すことができます。その種類の数は膨大で、数万種類に及びます。

しかし、このタンパク質を構成する「アミノ酸」という物質（有機化合物）は20種類しかありません。つまり、動物や植物は、わずか20種類のアミノ酸を組み合わせる1列につなぐことで、生体分子のタンパク質を数万種類も作り出すのです。

その20種類のアミノ酸には、イソロイシンやロイシン、バリン、ヒスチジン、リジン、アスパラギン、グルタミン酸、グリシン、チロシンなどと名前が付けられています。ヒトのタンパク質を構成するアミノ酸もこれら20種類のアミノ酸です。体内で合成できるアミノ酸（非必須アミノ酸）もありますが、合成できないアミノ酸（必須アミノ酸）もあり、私たちは食べ物や飲み物などでこれらの必須アミノ酸を摂取します。

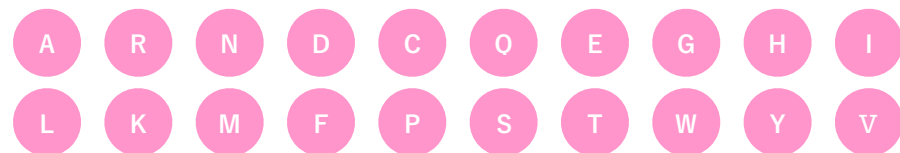


数万種類のタンパク質

組み合わせて一列につなぐ



20種類のアミノ酸



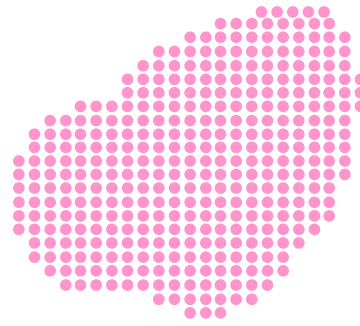
● アミノ酸のつながり

20種類のアミノ酸は形も性質も異なります。これらのアミノ酸は、異なるものですが、ブロックのように1列につながることができません。

例えば、アラニン（A）というアミノ酸の隣にフェニルアラニン（F）というアミノ酸がつながり、そのまた隣にアスパラギン（N）というアミノ酸がつながることができません。このように連なることがいくらでもできて、やがてひものような連なりが出来上がります。

そして、折りたたまれて立体的な構造をもつようになると、固有の働きをするようになります。これがタンパク質です。生体を作る分子として体のいろいろなところで用いられます。

繰り返しになりますが、生物はタンパク質のシステムとして捉えることができます。そのタンパク質は、アミノ酸という物質が20種類つながって出来上がったものです。つまり、生物は、階層構造として見ると、一番下の階層では、アミノ酸という物質が組み合わさったものによって構成されていると言えるわけです。



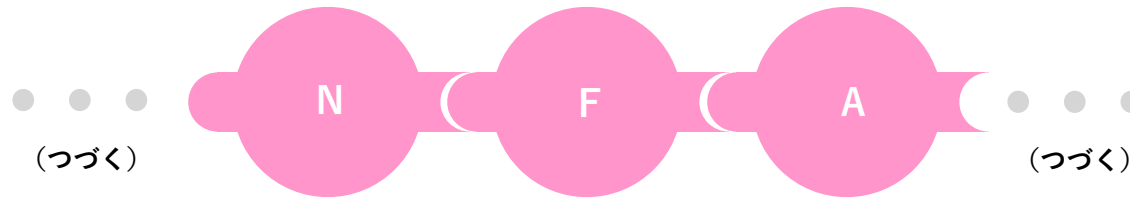
固有の形と働きを持った
タンパク質

紐状のつながりが立体的にまとまる
(折り畳まれる)



(つづく) (つづく)

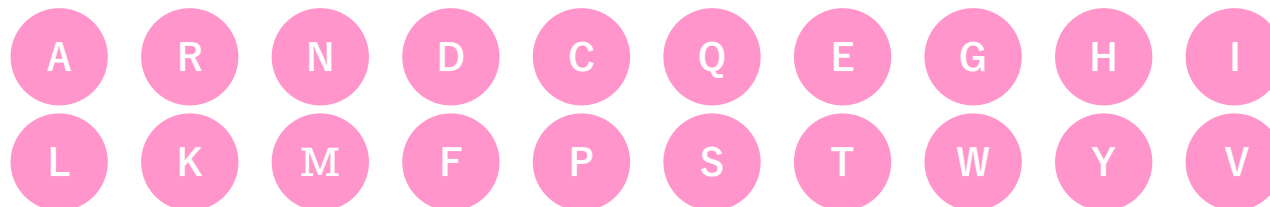
長くなる



一列につながる



20種類のアミノ酸



●並び方で変わる形と働き

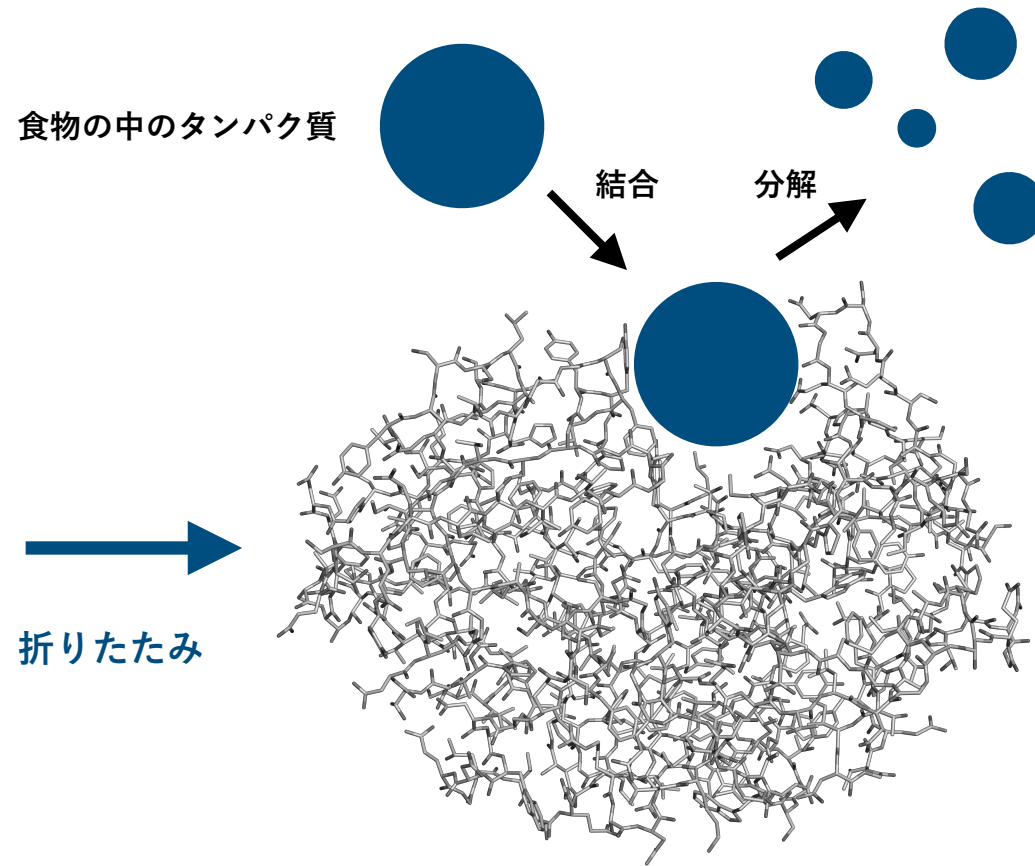
20種類しかないアミノ酸でも、その組み合わせは膨大です。だから、その並び方によって出来るタンパク質はさまざまなものになります。違う並び方であれば、違う形と働きをもったタンパク質になります。

一例として、胃液の中で消化酵素として働くペプシンというタンパク質を見てみましょう。このタンパク質を構成しているアミノ酸とその並び方は左の図の通りです。数多くのアミノ酸がつながり、特有の折りたたまれた立体的な形になると、消化酵素として働きます。

消化酵素は、食べ物の消化を促進し、体への吸収を助けます。この働きは、ペプシンが食べ物のタンパク質を取り巻いて作用し分解する（ペプチド結合を切断する）機能をもっているからです。

この機能は、性質の異なるアミノ酸の並び方によって生じます。ペプシン特有のアミノ酸の並び方が、食べ物のタンパク質に作用して分解できる原子や分子の並び方になっているのです。こうして消化促進の機能を発揮するわけです。

胃液中で消化酵素として働く



MKWLLLLSLVVLSECLVKVPLVRKKSRLRQ
NLIKNGKLDKDFLKTHKHNPASKYFPEAAA
LIGDEPLENYLDTEYFGTIGIGTPAQDFTVI
FDTGSSNLWVPSVYCSSLACSDHNQFNPD
DSSTFEATSQELSITYGTGSMTGILGYDTVQ
VGGISDTNQIFGLSETEPGSFLYYAPFDGIL
GLAYPSISASGATPVFDNLWDQGLVSQDLF
SVYLSSNDDSGSVLLGGIDSSYYTGSLNW
VPVSVEGYWQITLDSITMDGETIACSGGCQ
AIVDTGTSLLTGPTSAIANIQSDIGASENSD
GEMVISCSSIDSLPDIVFTINGVQYPLSPSAY
ILQDDDSCTSGFEGMDVPTSSGELWILGD
VFIRQYYTVFDRANNKVGLAPVA

ペプシンのアミノ酸の並び方

原子のレベルまで細かく描いたペプシンの形

●アミノ酸の配列を決めるもの

では、タンパク質のアミノ酸の並び方はどのようにして決められるのでしょうか。簡単に言ってしまうえば、それはmRNA（伝令RNA）によって決まります。

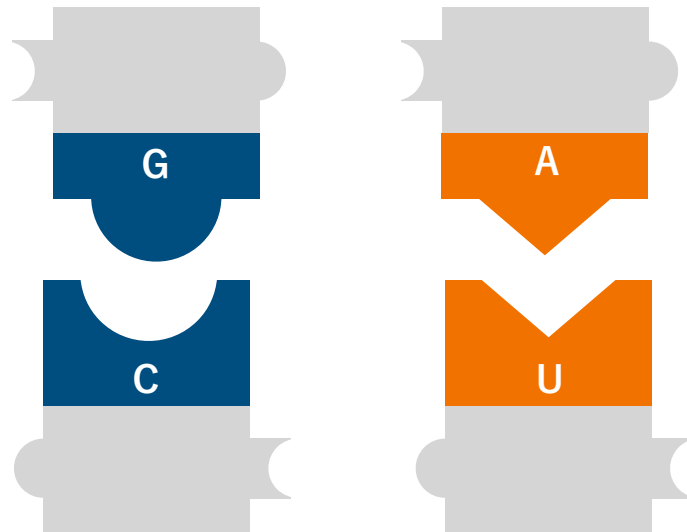
mRNAは、細胞の中にあります。体のどこの細胞でも、その中にmRNAが必ずあります。少し詳しい話になりますが、mRNAにはヌクレオチドという物質が付いていて、ここがアミノ酸の配列にかかわっています。

ヌクレオチドの種類は四つです。アデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、ウラシル（U）。その性質の最大の特徴は、それぞれペアを組める相手が決まっていることです。

mRNAは、この4種類のヌクレオチドがブロックのように1列につながってできています。このヌクレオチドの並び方を変えると、アミノ酸の配列も変わり、合成されるタンパク質も変わることになります。



組み合わせて一列につなぐ



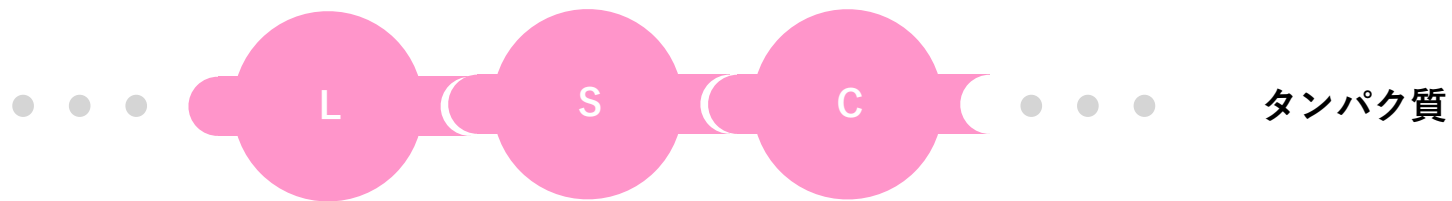
4種類（結合できる2ペア）の
ヌクレオチド

● アミノ酸を選んで運ぶ

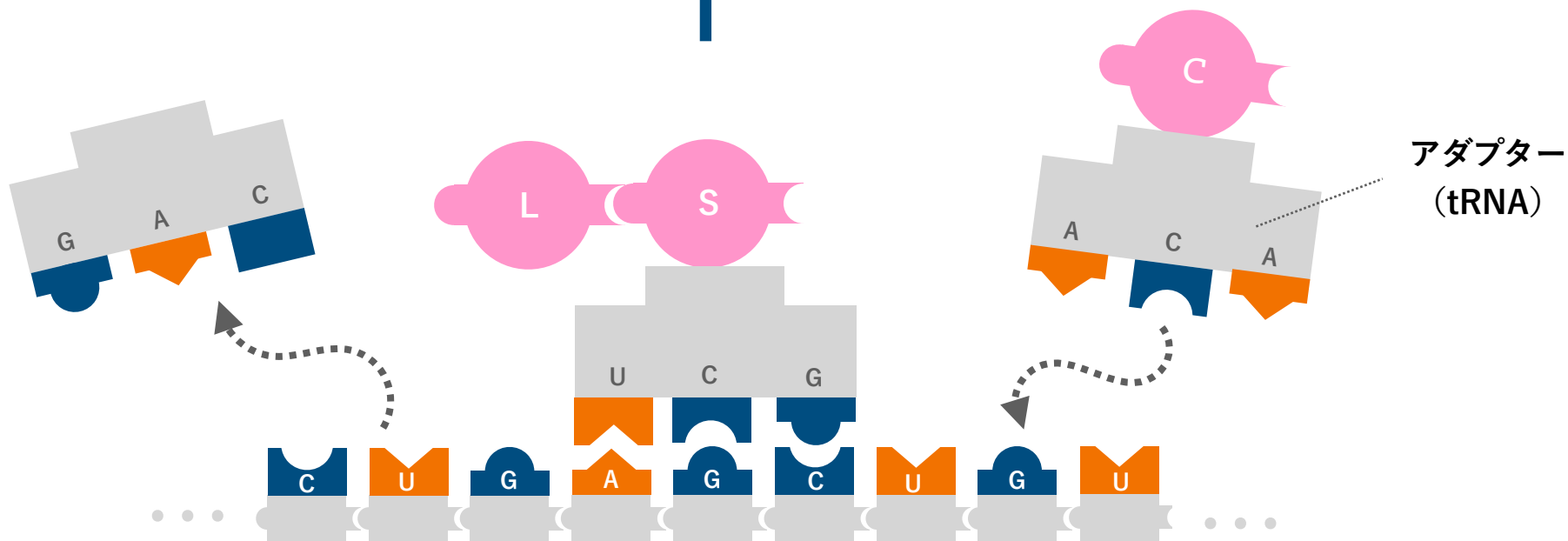
では、mRNAに付いている4種類のヌクレオチドは、どのようにしてアミノ酸の配列を決めるのでしょうか。簡単に言ってしまうと、「tRNA（転移RNA）」というものが決めます。

生き物は、食べ物のタンパク質を分解するなどしてアミノ酸だけになります。tRNAはこのアミノ酸を選択的に引き寄せることができるのです。

tRNAはアダプターのようなもので、mRNAのヌクレオチドの並びとペアになれる仕組みをもっています。mRNAの並びによってペアになるアダプター（tRNA）の型が一つに決まり、そのアダプターがつかまえられるアミノ酸も1種類のみなので、mRNAの並びでアミノ酸の配列が決まることになるわけです。



↑ アミノ酸がー列につながる



↑ アダプターを介し、3つ1組のヌクレオチドに対応するアミノ酸が集まる



●ヌクレオチドから変わる

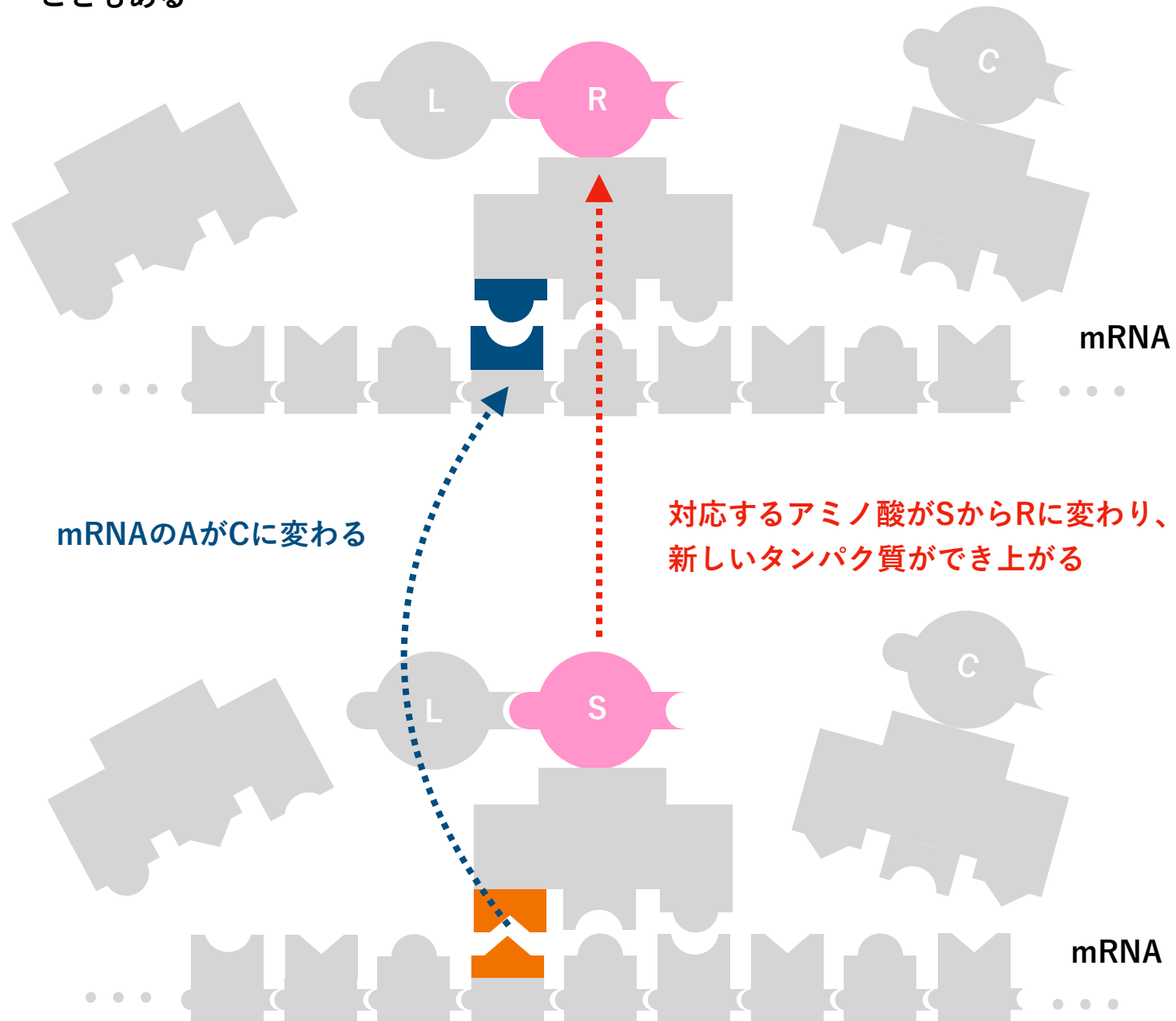
生物の体の中にはたくさん種類のタンパク質があります。そのタンパク質の種類はアミノ酸の配列で決まります。そのアミノ酸の配列は、mRNAのヌクレオチドの並び方で決まります。

mRNAのヌクレオチドの並び方が変わると、アダプター（tRNA）を介して引き寄せられるアミノ酸の種類が変わります。そのため、出来上がるタンパク質も異なります。

もし、何らかの理由でmRNAのヌクレオチド種類が部分的に変わってしまったら、どうなるでしょうか。例えば、ヌクレオチドの一つが「A」から「C」に変わった場合、対応するアダプターの型も変わります。もってくるアミノ酸も「S」から「R」に変わります。すると、アミノ酸の配列も変わるので、異なるタンパク質になります。

ただ、異なるタンパク質になっても、形や働きが変わることもあれば、変わらないこともあります。ここでのポイントは、ヌクレオチドが変わると異なるタンパク質が出来上がるということです。

新しいタンパク質は、元と比べて、形や働きに変化が生じることもあるし、生じないこともある



● ほぼみんな同じ仕組み

アダプターの役割をもつ tRNA には三つのヌクレオチドが付いています。その配列の並び方によってつかまえてくるアミノ酸が異なり、結果的に出来るタンパク質の形や働きも変わります。

前述しましたが、tRNA は mRNA とペアを組みます。少し具体的に言うと、mRNA のヌクレオチドが tRNA のヌクレオチドと符号するようにペアを組みます。だからアミノ酸の配列は、mRNA の三つ1組のヌクレオチドがもとめられていると言えます。

この mRNA の三つ1組のヌクレオチドのパターンは「コドン」と呼ばれます。いろいろなコドンがあり、それぞれ対応するアミノ酸は一つに決まっています（左の表）。

また、クジラのような大きな動物から単細胞の細菌まで、生物はほとんど同じ対応関係（コドン表）をもっています。ヒトを含めていろいろな生き物がいて、いろいろな形や特徴をもっていますが、その形や特徴を生じさせるタンパク質の作り方は、どの生き物もほぼ同じです。

| | | | |
|--|--|--|--|
| UUU → F UUC → F UUA → L UUG → L | UCU → S UCC → S UCA → S UCG → S | UAU → Y UAC → Y UAA → * UAG → * | UGU → C UGC → C UGA → * UGG → W |
| CUU → L CUC → L CUA → L CUG → L | CCU → P CCC → P CCA → P CCG → P | UAU → Y UAC → Y UAA → * UAG → * | CGU → R CGC → R CGA → R CGG → R |
| AUU → I AUC → I AUA → M AUG → M | ACU → T ACC → T ACA → T ACG → T | AAU → N AAC → N AAA → K AAG → K | AGU → S AGC → S AGA → R AGG → R |
| GUU → V GUC → V GUA → V GUG → V | GCU → A GCC → A GCA → A GCG → A | GAU → D GAC → D GAA → E GAG → E | GGU → G GGC → G GGA → G GGG → G |

* ……対応するアミノ酸がなく、タンパク質の合成が終了する。

● mRNAとDNAの関係

mRNAのヌクレオチドの並び方がアミノ酸の並び方を決めて、結果的にタンパク質の形や働きが決まります。

では、mRNAのヌクレオチドはどのように並ぶのでしょうか。それを決めるのは、細胞の核の中にあるDNAです。

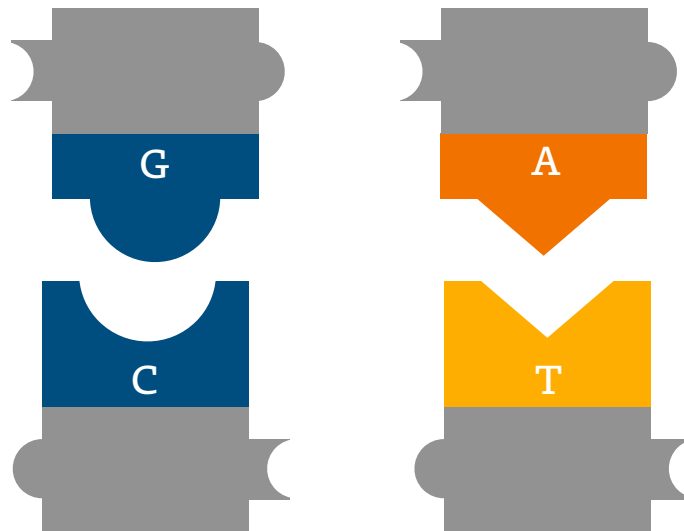
核の中のDNAは、mRNAと同様に、4種類のヌクレオチドが1列につながっています。ただ、mRNAとは少し違います。DNAのヌクレオチドの向かい側には、ペアとなるヌクレオチドが並行しているのです。DNAと対をなしていて、通常は2本の並んだ長いひも（2本鎖）のように存在しています。

また、RNAのヌクレオチドはアデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、ウラシル（U）でしたが、DNAのヌクレオチドはアデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、チミン（T）です。つまり、ウラシル（U）の代わりにチミン（T）が用いられます。詳しい説明は避けませんが、より安定で分解されにくい仕組みになっています。



2本鎖DNA

組み合わせて一列につなぎ、
対をつくる



4種類（結合できる2ペア）の
ヌクレオチド

【RNAとの違い】

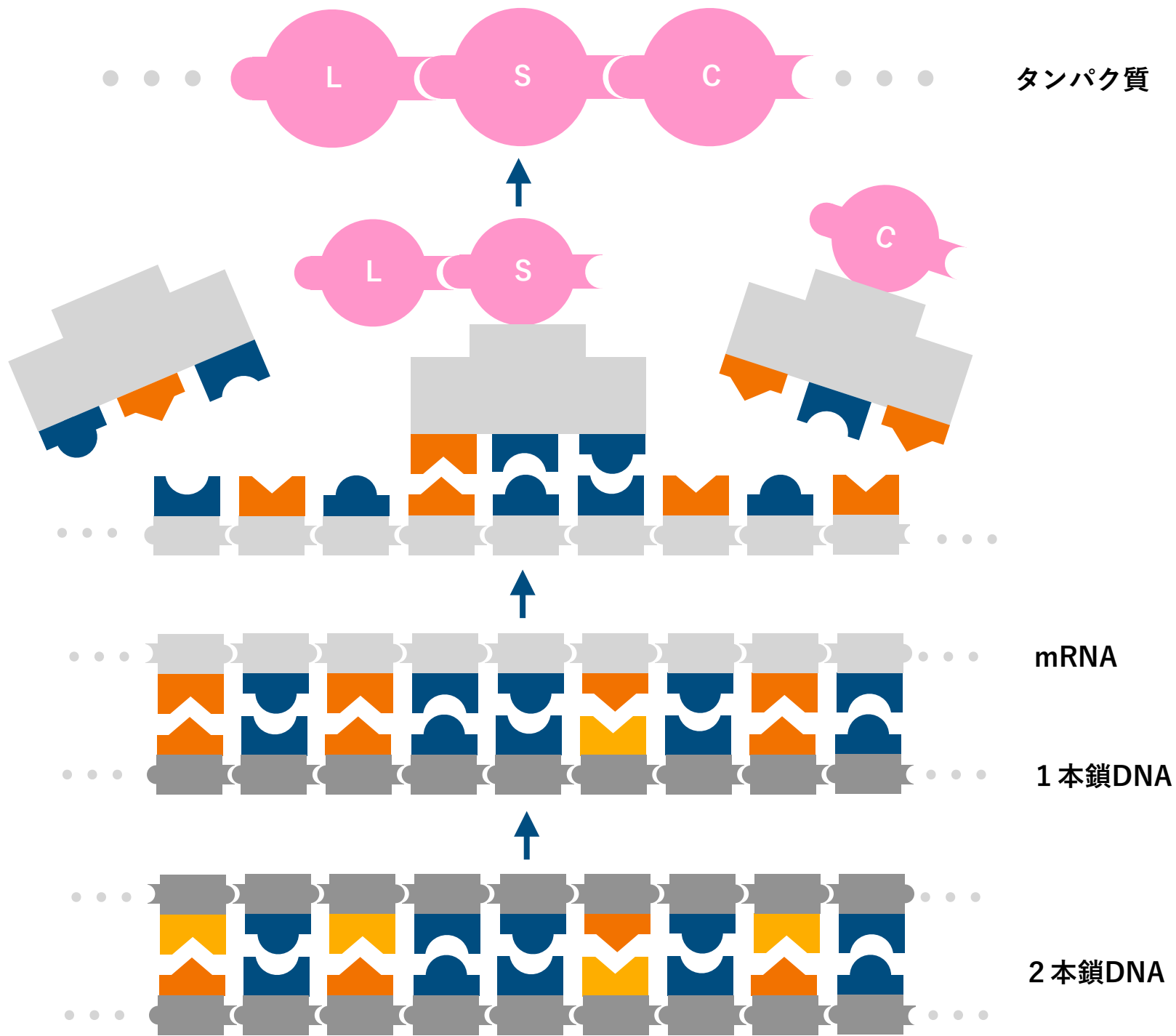
- ・Uの代わりにTが用いられる
- ・より安定で分解されにくい

●結局はDNAが決めている

mRNAのヌクレオチドの並び方は、DNAのヌクレオチドの並び方で決まります。では、DNAはどのようにmRNAの並び方を決めるのでしょうか。

まず、2本鎖のDNAが部分的にほどけて1本になります。そのうちの1本は型のような役割を担い、ペアとなるヌクレオチドを次々に決めることができます。mRNAは、この1本鎖のDNAの型に合わせるようにして、ヌクレオチドの配列を作っていきます。言い換えると、1本鎖DNAが、自分のヌクレオチドのペアとなるヌクレオチドを取り込むようにして、mRNAを合成していくのです。そして、そのmRNAがtRNAを介してアミノ酸を選んで集め、タンパク質を作り出すわけです。

話を整理しますと、DNAは向かい側にペアとなるヌクレオチドを並べることで、mRNAのヌクレオチドの並び方を決め、そのmRNAはタンパク質のアミノ酸の並び方を決めます。元をたどれば、DNAがタンパク質にかかわる情報をもっていると言えます。



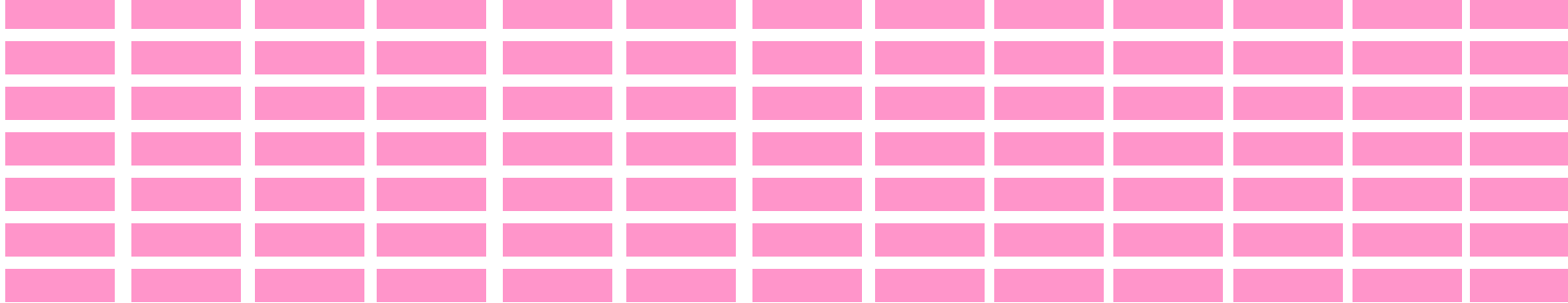
●DNA・ゲノム・遺伝子

DNAは、細胞の核の中にあつて、長いひものような形をしています。ただ、このDNAは一様にタンパク質にかかわる情報をもっているわけではありません。

DNAは大きく四つの部分に分けることができます。一つ目は、タンパク質のアミノ酸の並び方にかかわる部分。二つ目は、タンパク質をいつでもだけ作るかという調節にかかわる部分。三つ目は、mRNA以外の独自に働くRNAにかかわる部分。四つ目は、機能がわかっていない、あるいは機能をもっていない部分です。

「遺伝子」と呼ばれるものは、DNAの中で、この一つ目と二つ目と三つ目にかかわるところを指します。つまり、タンパク質作りにかかわる部分と、独自に働くRNAにかかわる部分のことです。ここを「遺伝子」と呼びます。

また、ある生物を作るのに必要な遺伝子のひとそろいのセットを「ゲノム」と呼びます。ヒトを含む生物の多くは、一つの体細胞の中にゲノムを2セットもっています。そのような個体を「二倍体」と言います。

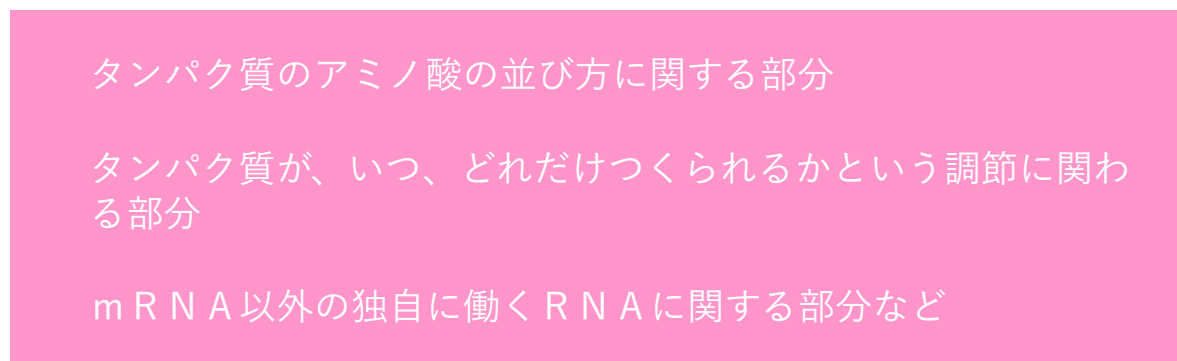


ゲノム

すべての遺伝子をセットに



遺伝子



上記の機能を持っていない部分



DNAの部分を分類する



2本鎖DNA



【承】 DNAは変異する
～新たな形や性質を得るプロセス～

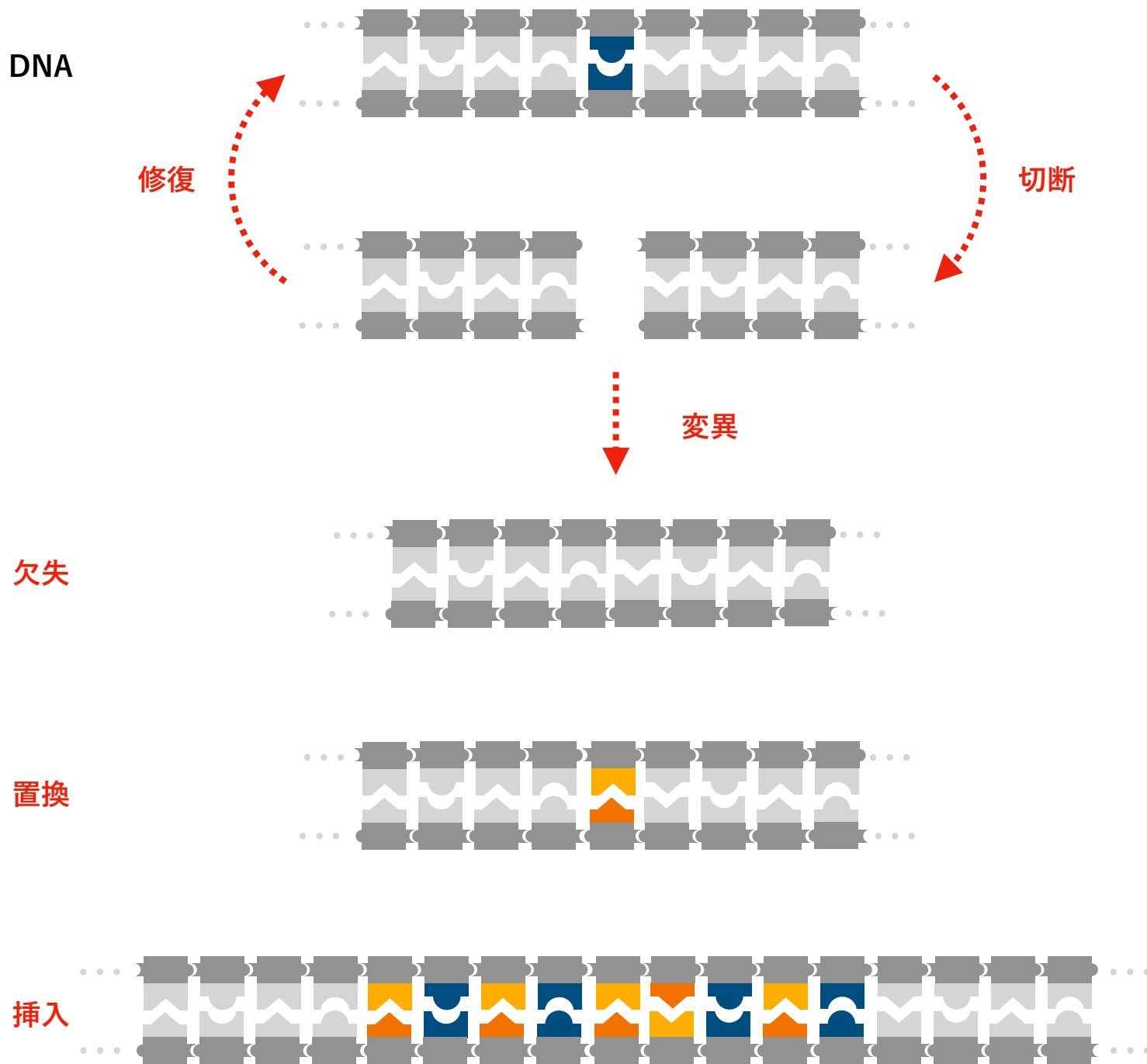
●DNAが変異するとき

DNAは、細胞の核の中にあります。そして、とても長いひものような形をしています。

もし、このDNAが何らかの原因で切断されたらどうなるでしょうか。二つの場合が考えられます。一つは、細胞内の修復機構によって元に戻るという場合。もう一つは、元通りになることができず、DNAに「変異」が生じるという場合。

このDNAの変異には、大きく三つのパターンがあります。一つ目は、DNAのヌクレオチドが抜け落ちるパターンです（欠失）。二つ目は、DNAのヌクレオチドが置き換わるパターン（置換）。三つ目は他のDNAが入り込むパターン（挿入）。これらをDNAの変異と呼んでいます。

ちなみに、よく耳にする「突然変異」も、このDNAの変異によって生じるものです。自然の状態でも、高い確率ではありませんが、ある一定の確率で生じます。この変異が生物の進化をもたらすこともあります。



●タンパク質が変わるとき

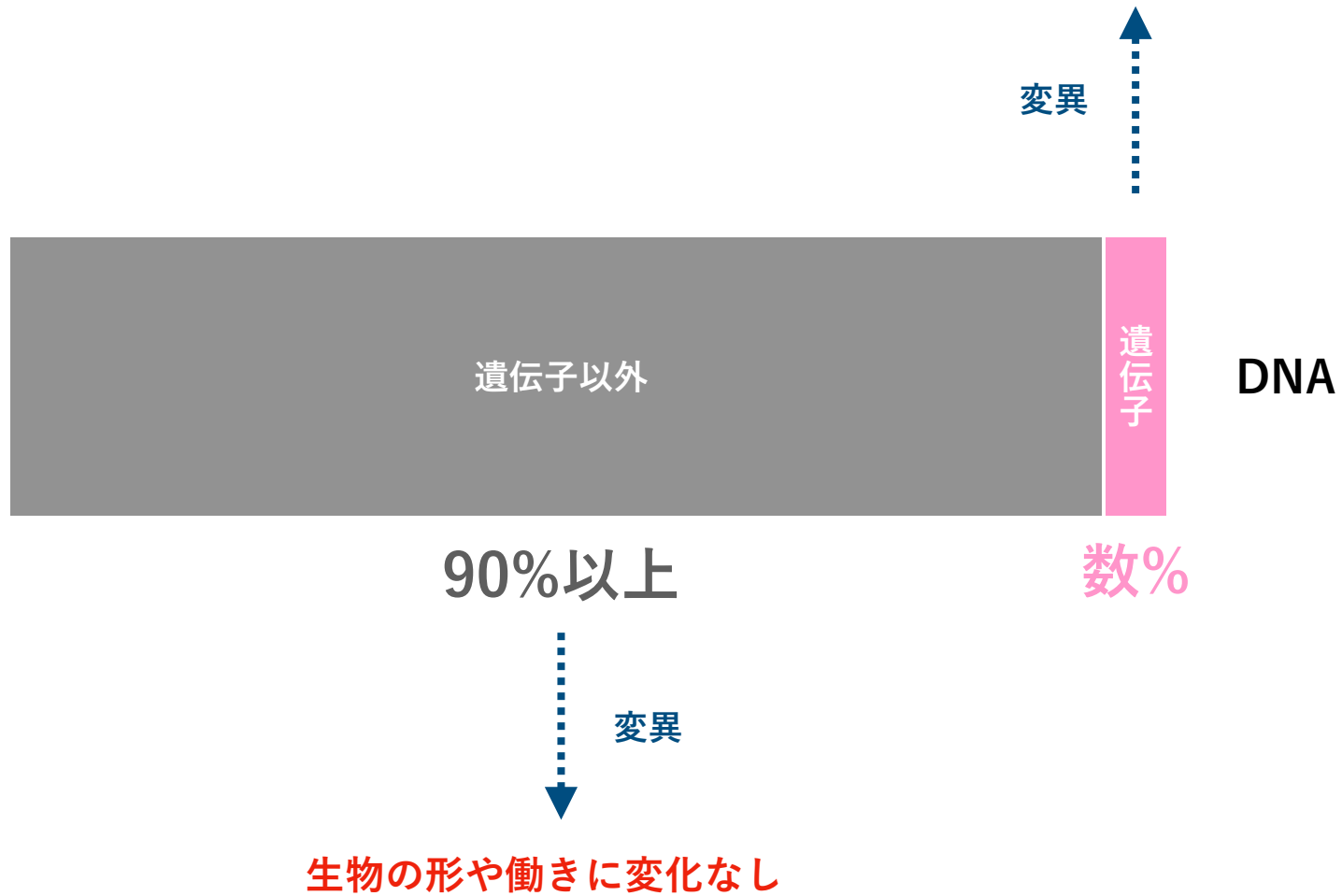
DNAは、ときに変異します。

では、DNAが変異すると、どうなるのでしょうか。DNAが変異すれば、mRNAが変わります。すると、tRNAが運んで来るアミノ酸も変わります。結果的に、出来上がるタンパク質や、あるいはタンパク質が作られるタイミングや量などが変わることがあります。

DNAの変異があっても、遺伝子に該当する部分でなければ、タンパク質の形や働きへの影響はありません。DNAにおけるタンパク質にかかわるDNA、つまり遺伝子は全体の数%です。90%以上は遺伝子以外のものであり、ここが変異してもタンパク質の形や働きに変化はありません。

また、タンパク質にかかわるDNA（遺伝子）が変異しても、形や働きに影響する場合としない場合があります。話を整理すると、タンパク質が変異するのは、遺伝子にかかわるDNAが変わる場合で、かつ実際に変化する影響があります。

タンパク質の形、働き、つくられるタイミングや量などに変化する場合としない場合がある



●変異が子に伝わるとき

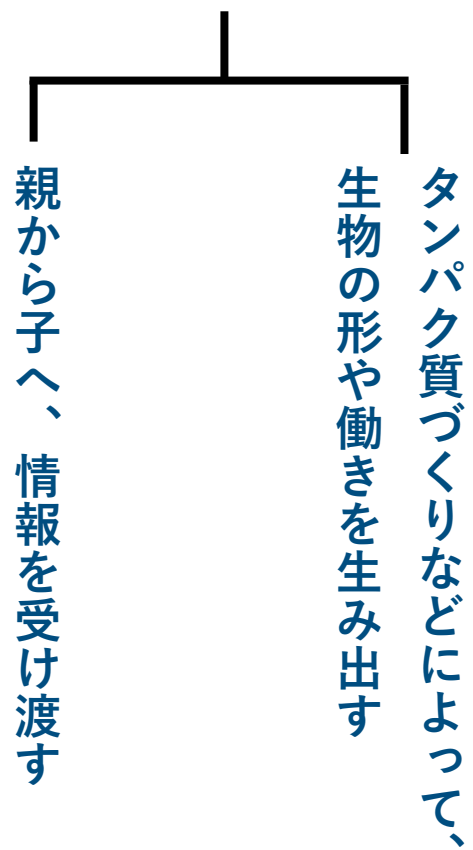
ゲノムとは、その生き物がもつ、ひとそろいの遺伝子セットのことです。この遺伝子の集まりであるゲノムには、大きく二つの役割があります。

一つは、タンパク質を作ることなどによって、生物の形や働きを生み出すという役割。もう一つは、親から子へ、その情報を受け渡すという役割です。したがって、ゲノムを構成するDNAの変異が生殖細胞（精細胞や卵細胞など）で起こった場合、その変異は親から子へ伝わります。そして、その変異は子の体の形や働きなどに現れます。

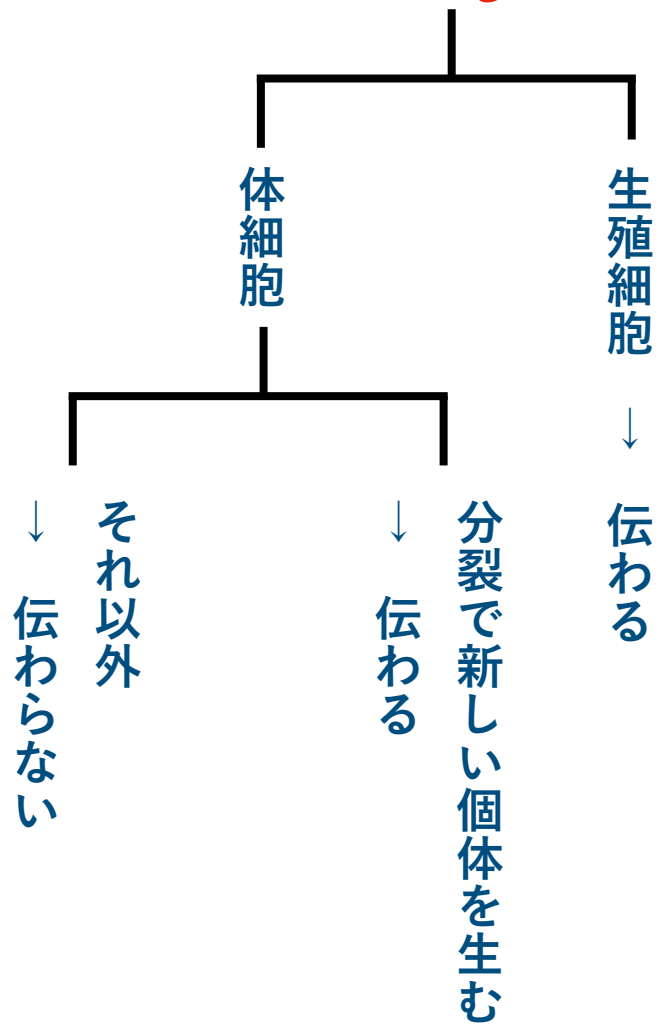
また、体細胞（生殖細胞以外の細胞）に起こった場合は、このようにな引き継がれ方はしません。しかし、細胞分裂で新しい個体が生まれる場合（単為生殖、塊根、地下茎、むかご、無性芽など）は次世代に伝わります（それ以外の場合は伝わりません）。

話を整理すると、変異は親から子へ伝わる場合があり、生殖細胞が変異した場合は子に伝わります。一方、体細胞が変異した場合は、細胞分裂の場合のみ伝わります。

ゲノムの役割



ゲノムを構成する DNA の変異



●自然環境でのゲノムの変化

ゲノムの変化（変異）は自然環境で起こる現象です。例えば、太陽からの紫外線や宇宙や地中などからの放射線がDNAに影響を与えて変異を生じさせ、それがゲノムの変化として子に引き継がれることがあります。

また、化学物質などの環境要因によってDNAが変異する場合もあります。さらに、生物がDNAをコピー（転写）するときミスが生じて変異することもあります（突然変異）。

あるいは、体内に入ったウイルスが外来遺伝子を持ち込んだり、有性生殖（親の精子と卵が受精して子が生まれる生物の増え方）によって親の遺伝子が混ざり合って新しい遺伝子の組み合わせが生まれたりしたときも、ゲノムは変化します。

ゲノムは不変のものではありません。これまで自然環境の中で変わり続けてきました。前述しましたが、この変異が生物の進化を可能にして、その結果として、今のいろいろな生物がいる世界を作り出したとも言えます。

自然環境でのゲノムの変化

紫外線や放射線、化学物質などの環境要因による
DNAの変異

生物がDNAをコピーするときのミスによる変異

ウイルスによる外来遺伝子の持ち込み

有性生殖 など

【転】 DNAの変異を利用する
～農業技術への応用～

●人工的にゲノムを変化させる

ゲノムは変化します。その変化によって、多様な個体が生まれま
す。

人類は、この自然現象を自分たちのために利用するようになりまし
た。多様な個体の中から有用な性質をもった個体を分離し、それを積
極的に栽培あるいは飼育するようになったのです。

さらに人類は、ゲノムの変化が個体の多様性を生み出す仕組みを解
明し、その仕組みを応用しようとも考えました。そして自然には生じ
得ない、あるいは生じにくいゲノムの変化も人工的に生じさせ、自ら
に有用な品種改良を行うようにもなりました。

農業分野で人工的にゲノムを変化させる方法は、主に左のような技
術があります。

例えば、多くの国で食べられる野菜の一つにトマトがあります。こ
のトマトは、多く消費される一方で、腐りやすいという難点がありま
す。この難点を遺伝子組み換えやゲノム編集技術でなくすことができ
るかもしれません。

農業分野での人工的なゲノムの変化

人工的な交雑（受精・受粉）

人工的な細胞融合

人工的な突然変異

遺伝子組換え

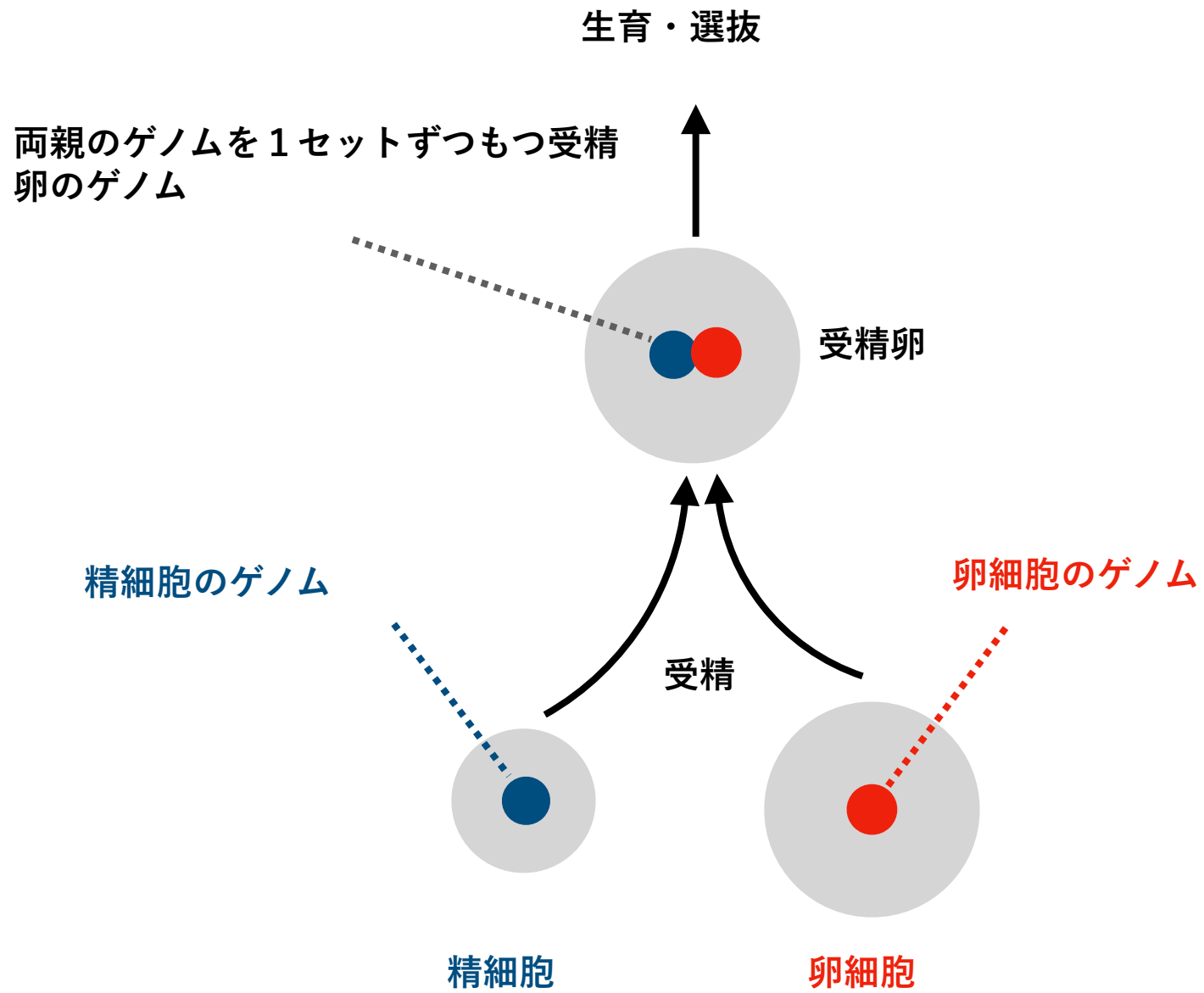
ゲノム編集 など

●人工的な交雑（受精・受粉）

人工的にゲノムを変化させる方法を一つずつ見ていきましょう。

最初は「人工的な交雑（受精・受粉）」です。この方法は、試行錯誤を繰り返しながら同種または異種の生物の生殖細胞を受精・受粉させるやり方です。生殖細胞とは、精細胞あるいは卵細胞のことで、体細胞と異なり1セットのゲノムしかもちません。この生殖細胞の受精を試行錯誤しながら、その中で育った個体のうち親の性質の有用なところを受け継いだり親にない有用な性質をもったりした生物を選び出していきます（選抜）。

例えば、たくさん実るけれどおいしくないトマトがあり、その一方で少ししか実らないけれどおいしいトマトがあるとき、その両者を人工的に交雑させれば、さまざまな個体の子として生まれます。その中からおいしくて数多く実る個体を選び出し、さらに交雑。これを繰り返していったってゲノムを変化させることができれば、その種子からは高い確率でおいしいトマトが数多く実る個体が現れるようになります。



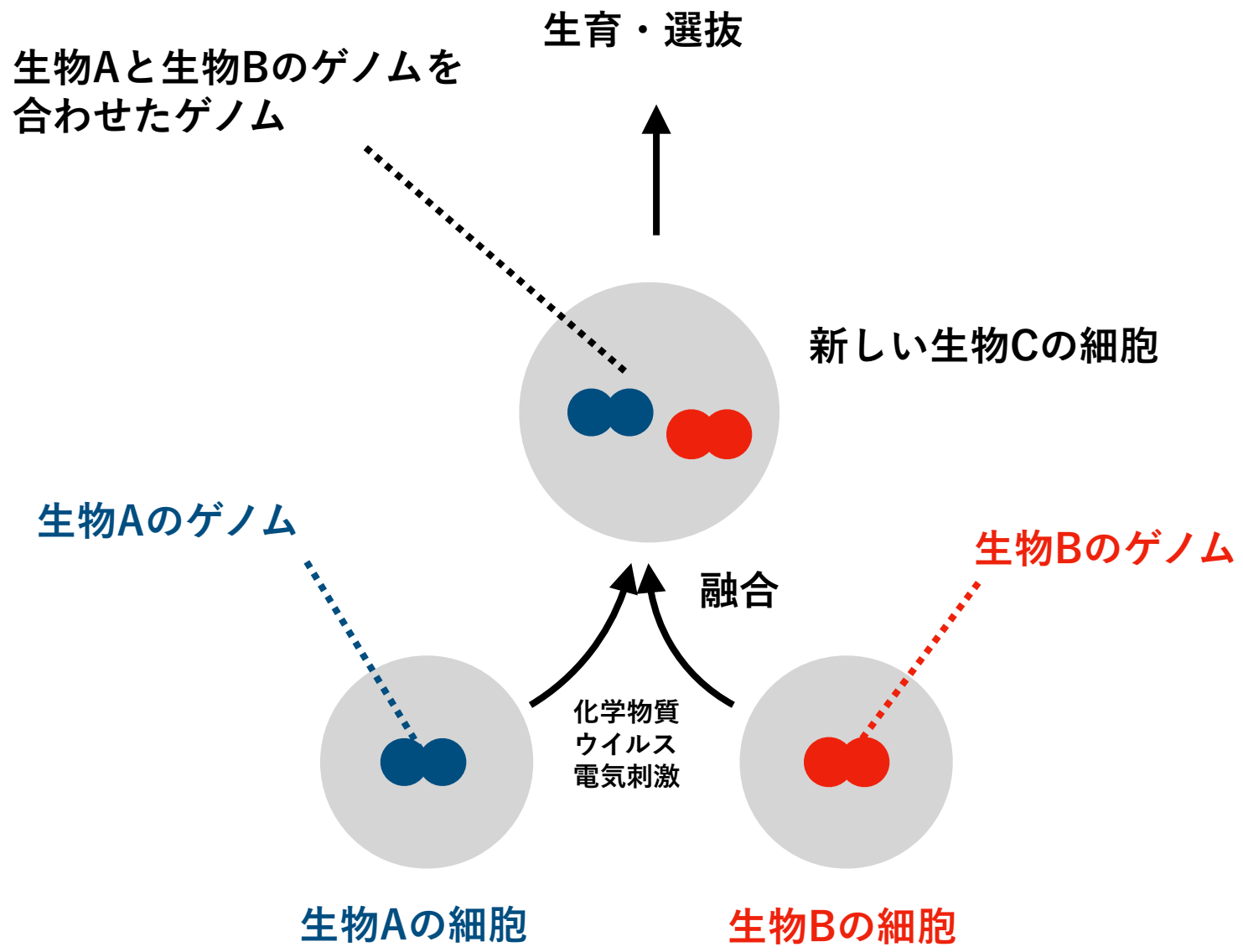
●人工的な細胞融合

二つ目は「人工的な細胞融合」です。

自然環境でも、二つ（あるいはそれ以上）の細胞が合体して一つの細胞になる「細胞融合」が見られます。受精はその代表例です。

人工的にこの細胞融合を生じさせるには、まずさまざまな生物の細胞を化学物質、電気刺激、ウイルスなどを用いて、試行錯誤を繰り返して融合していきます。そして、元となった生物がもつ性質の有用なところを受け継いだり、新たに生じた有用な性質をもったりした生物を選んでいくのです。細胞融合は、技術的にはどんな細胞同士でも基本的に可能です。動物と植物の細胞同士でもできます。

農業においては、新しい品種を作るときに利用され、近縁種の細胞同士を融合させる場合が多いです。実例として、ジャガイモとトマトの細胞を融合させて作り出したもの（ポマト）や、ハクサイと赤キャベツを融合させたもの（ハ克蘭）などがあります。



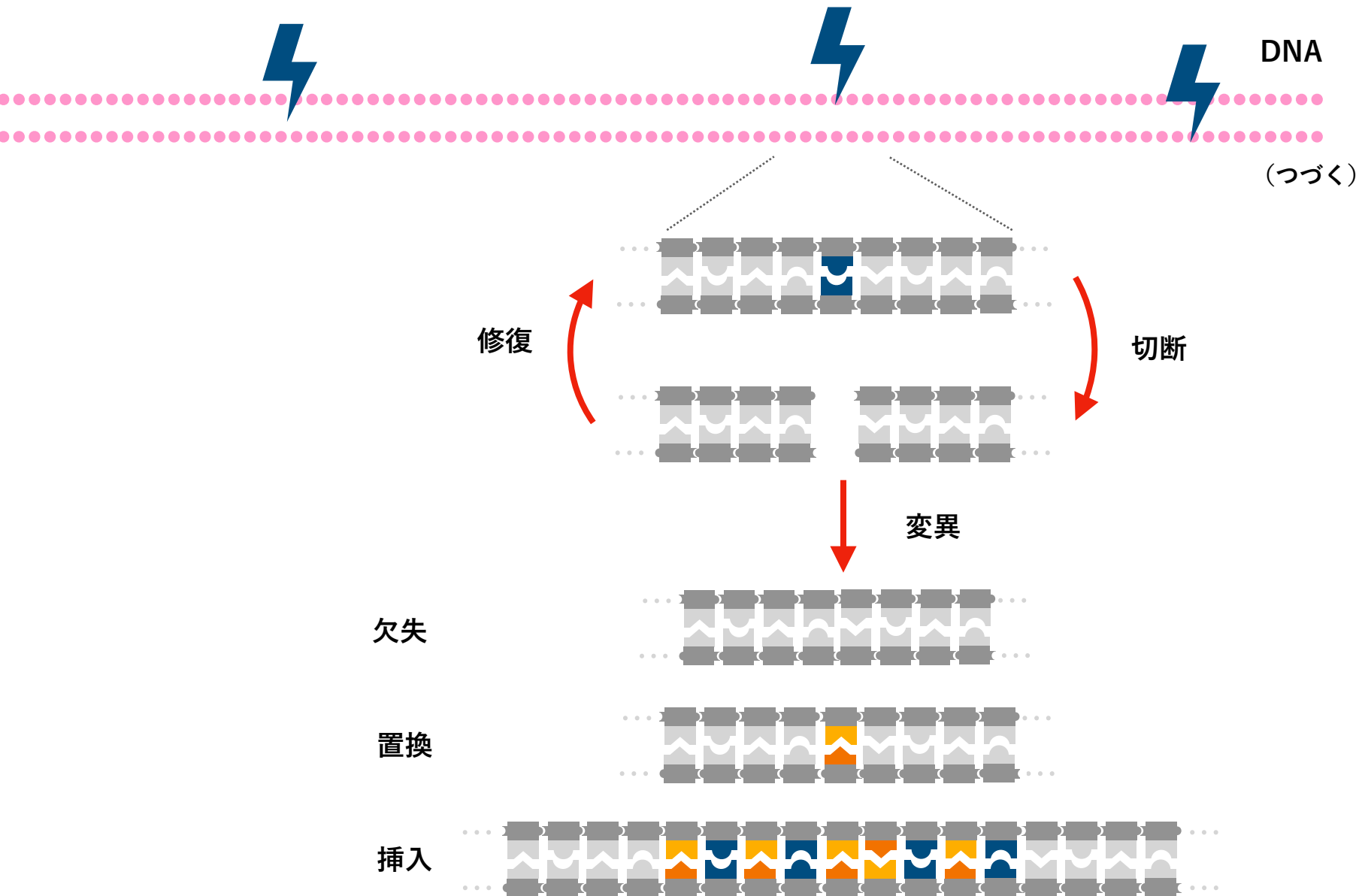
●人工的な突然変異

自然環境におけるDNAの変異のきっかけは、何らかの理由でDNAが切断されたときに生じます。この切断は人工的に引き起こすことも可能です。例えば、ゲノム全体に放射線を当てたり、化学物質で処理したりすると、DNAを切断できます。

ただ、人工的に切断しても、修復機構が働くので、元通りになる場合が多いです。これは自然環境と同じです。しかし、ときに突然変異が生じる場合があります。この偶然に期待してDNAの切断を行っていき、新たに有用な性質をもつ個体が生じたら、それを選び出していくのです。

一例として、ナシの「二十世紀梨」の中には、病気（黒斑病）に強い品種（「ゴールド二十世紀」）があります。これは放射線（ガンマ線）を照射することで作り出した品種です。また、イネにおいても、このように品種改良して、米アレルギーの人でも食べやすくした米（低アレルゲン米）を作った例もあります。

放射線や化学物質で、ゲノム全体を処理する



●遺伝子組み換え

生物の性質はタンパク質から生じます。そのタンパク質の形や働きは遺伝子が決めています。その遺伝子の実体はDNAのヌクレオチドの配列です。

ある生物の性質にかかわる遺伝子のDNAを特定して取り出し、別の生物のDNAに挿入すれば、その生物は新たな性質を得ることが可能になります。実際に人工的にそれをする技術があり、「遺伝子組み換え」と呼ばれます。

DNAを調べることで、有用な性質にかかわる遺伝子がどこにあるかがわかります。それを取り出すことも可能です。その切り出した遺伝子のDNAを、化学物質や電気刺激、バクテリアなどを用いて、改良したい生物のDNAに導入することができます。

挿入場所は偶然に依存しますが、目的の性質を現した個体を選抜していくことで、新たな品種を作り出すことが可能です。話を整理すると、ある生物から目的のタンパク質を作る遺伝子を取り出して、改良したい生物のDNAの中に人為的に組み込むことで、新しい性質を加えられるということです。

生物によい性質を生じると考
えられる遺伝子のDNA



化学物質、電気刺激、バ
クテリアなどを
用いて細胞に導入

DNA

(つづく)



(つづく)

挿入



●ゲノム編集

DNAを調べれば、どのような遺伝子がどこにあるかを特定することが出来ます。そうして見つけた遺伝子の場所を切断したり欠失した状態にしたりすれば、その遺伝子がかかわる性質を出さないようにできます。

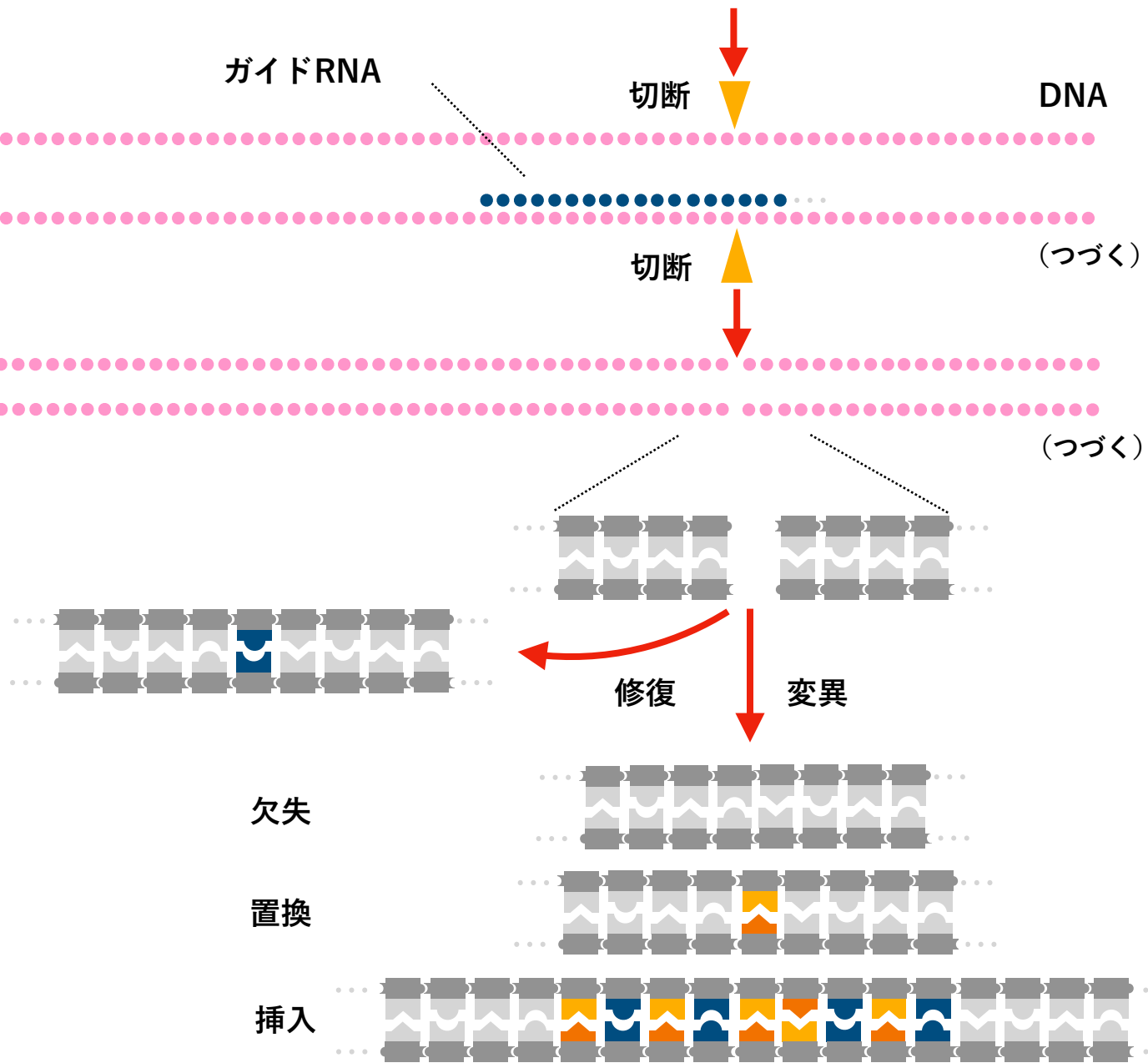
また、欠失させた後に別のヌクレオチドを置けば、別の性質を得ることが期待できます。あるいは、目的の性質をもつ遺伝子DNAを挿入できれば、意図通りの変異をもつゲノムに変化させられます。

これらの切断や挿入などを人工的に行える技術がすでにあり、「ゲノム編集」と呼ばれます。

やり方は、まず変異を起こしたいDNAの部位周辺に対してペアになるRNA（ガイドRNA）を設計します。次に、そのガイドRNAを、DNAを切断する酵素の遺伝子などと一緒に細胞へ導入します。すると、ある確率で意図した通りの変異をもつゲノムに変化します。挿入したい遺伝子を細胞に導入し、切断部位に挿入することもできます。

先に説明した遺伝子組み換えの技術とは異なり、切断や挿入できる場所を狙えるのが特徴です。

切断したい部位周辺のDNAとペアになるRNA（ガイドRNA）、DNAを切断する酵素の遺伝子などを細胞に導入する



● mRNAを用いた技術

前述しましたが、タンパク質の形や働きはアミノ酸の並び方で決まります。このアミノ酸の並び方は、mRNAのヌクレオチドの配列で決まります。

それなら、あらかじめ人工的に設計したmRNAを細胞に外から導入すれば、意図したタンパク質を作ることができます。実際に、このようにしてタンパク質を作り出す技術が開発されています。

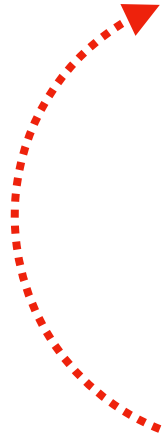
この技術の特徴は、ゲノムを変化させずに、意図した通りにタンパク質を作ることができる点です。また、人工的に作り出した外来mRNAもやがて分解されるので、その存在は一時的なものとなります。

例えば、新型コロナウイルスのワクチンの中には、この技術が用いられたものもあります。それまでのワクチンは、ウイルスの一部のタンパク質を投与することで、体が反応して抗体を作り、免疫を獲得するという仕組みでした。これに対してmRNAを用いたワクチンは、ウイルスのタンパク質を作る遺伝情報の一部を投入。体の中でウイルスのタンパク質の一部が作られ、体が反応して抗体を作り出します。

細胞



mRNAが分解され、
タンパク質が残る

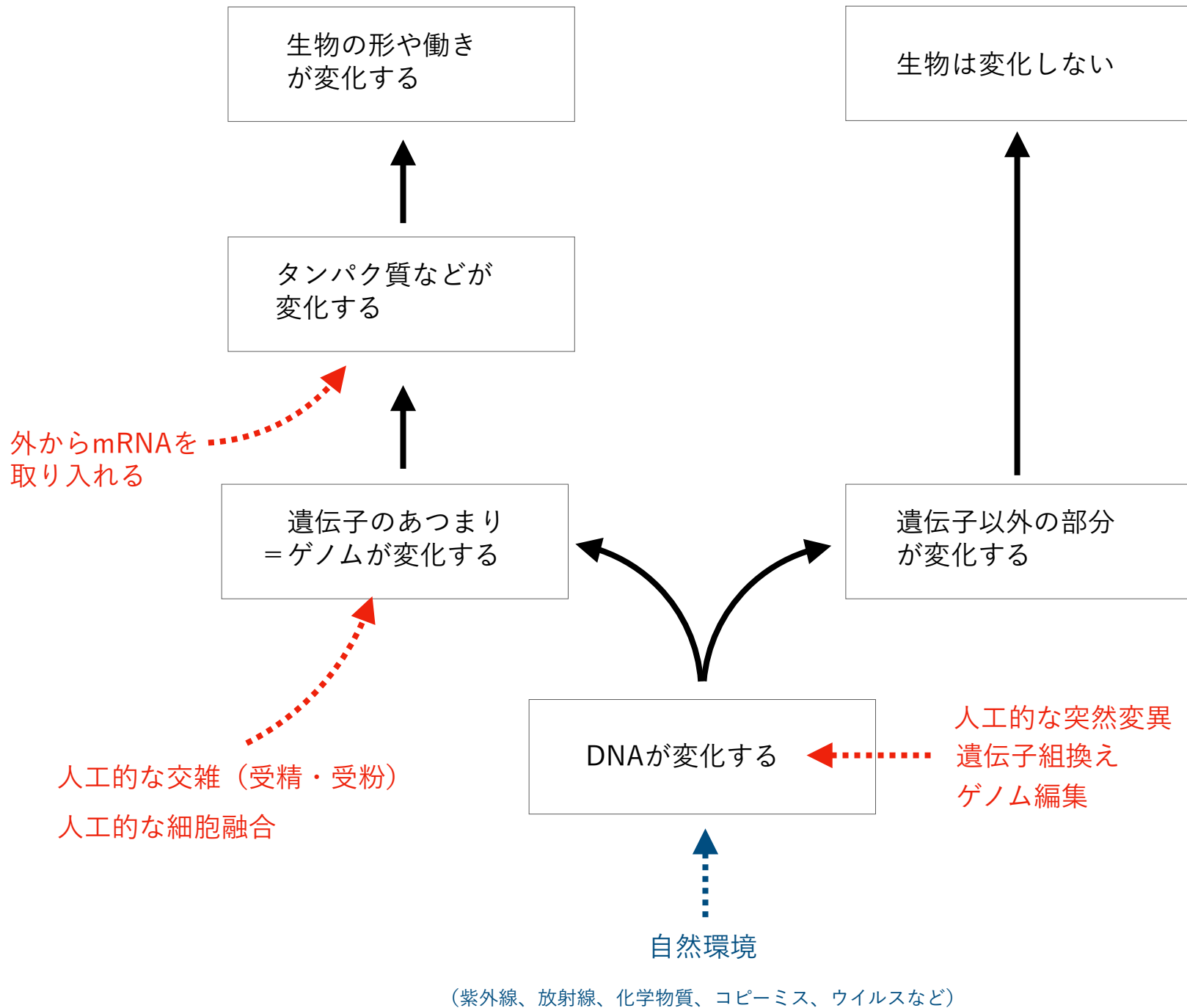


細胞



mRNAを細胞に導入すると、タン
パク質がつくられる





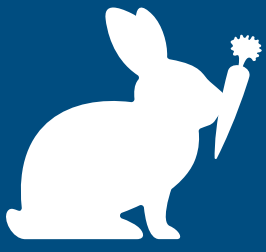
これまでの話をまとめてみましょう。

【結】 あなたはどう思いますか？
～農業技術の対話へ～

あなたはここに紹介した農業技術についてどのように受け止めましたか。

循環共生圏農工業

〈分子ロボットを活用した農業〉

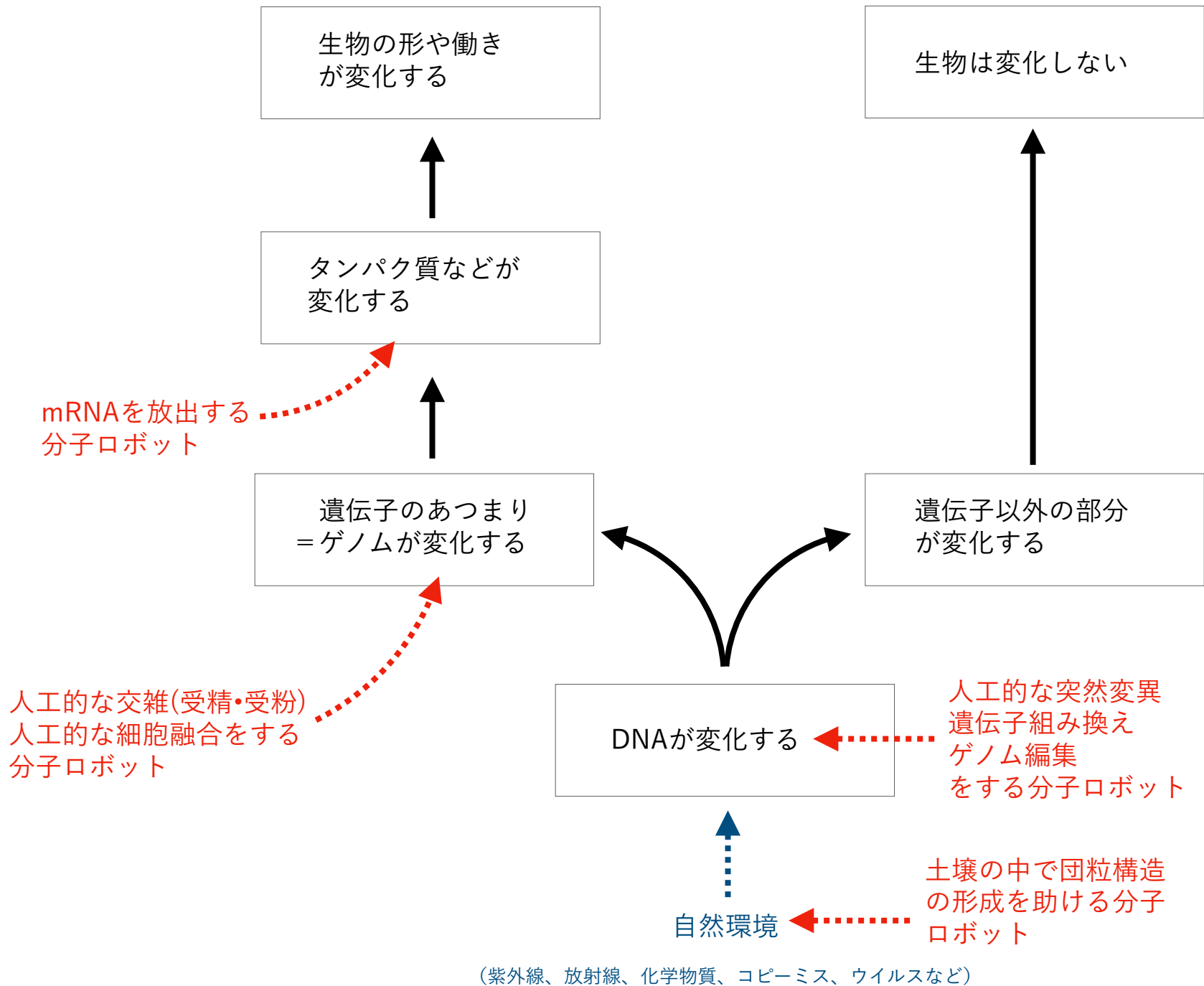


●分子ロボットを活用した農業

農業技術の進展は止まりません。

例えば、現在の最先端の研究開発の現場では、ナノサイズ（分子サイズ）の分子ロボットが作られつつあります。うまく作り出すことができれば、分子ロボットが直接的に細胞やDNAを操作することが可能となります。コロナワクチンのようにmRNAをロボットから放出したり、あるいは人工的な交雑（受精・受粉）をしたり、人工的な細胞融合を助けたり、人工的な突然変異や遺伝子組み換え、ゲノム編集をすることで品種改良をしたり、土壌中で細菌や真菌と一緒に becoming 有用に働いたりする分子ロボットなどが考えられます。

このような分子ロボットについて、どう思われますか。受け入れられるかもしれないと考える人は、どのような分子ロボットなら農業に受け入れられると思いますか？

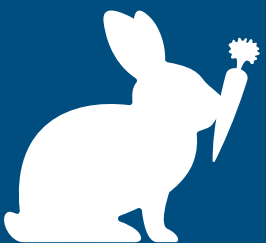


おわりに

〜できる限り正確な技術情報に基づく議論を〜

東京工業大学名誉教授・恵泉女学園大学客員教授

小長谷明彦



分子と同じナノスケールのロボットを作ることは可能なのだろうか？ そのような疑問から、日本では2010年より、生体分子で構成される「分子ロボット」の研究が始まり、実際にアメーバのように動いたり、筋肉のように収縮する分子ロボットが創生された（文献1）。

分子ロボットはDNAを自由に切断、編集、増幅することができるので、細胞中の遺伝子を操作することも可能となる。すなわち、遺伝子に人工的に突然変異を加えたり、遺伝子を別の遺伝子に組み換えたり、壊れた遺伝子を修復したりする分子ロボットを創生することが技術的には可能である。

では、このような遺伝子操作をする分子ロボットを創生して農業に応用するとは技術的に可能だとしても、本当に社会に受け入れられることは可能なのだろうか？ 仮に社会に受け入れられるとしたら、どのような分子ロボットなのだろうか？

このような疑問に答えるために、分子ロボット研究者と倫理研究者が集まって「分子ロボット倫理研究会」を発足し、農業関係者ならびに一般市民との対話集会を行った（文献2）。

本報告書は、科学コミュニケーション研究所と吉田さんと小長谷が2022年1月23日に開催された分子ロボット倫理研究会における農業関係者との対話集会のために作成した資料に、小長谷が説明した内容を文字に起こして加え、さらに加筆修正したものである。具体的な農業用分子ロボットを開発する前に、できるだけ正確な技術情報に基づいて議論することが大事だと考えている。

遺伝子操作の話は、通常は「分子生物学」の知識を前提とするのでとても難解である。本報告書では前提知識なしでも遺伝子操作の概念を直観的に理解できるように、個体から細胞、分子、遺伝子操作と還元的に説明するようにした。本報告書が遺伝子操作の理解につながれば望外の喜びである。

文献1…分子ロボティクス研究会（著）分子ロボティクス概論〜分子のデザイン

