

人類 100 億人時代到来 ～作物の細胞を改良して切り拓く未来～

石井孝佳*

〔キーワード〕：植物育種，交雑，雑種，顕微受精法，植物細胞遺伝学

1. はじめに

2022 年，世界人口は 80 億人に達した。そして，2050 年頃には 100 億人近くに到達することが予想されている。世界規模で人口が増加する中で，人類の社会活動によるさまざまな問題が顕在化してきている。問題は一国にとどまらず，世界全体で関連性を持っている。特に環境や食糧問題は，地球規模で解決すべき喫緊の課題である。日本は食料の多くを諸外国から輸入しており，地球規模の環境変動によって新たな病害虫や高温，早魃などが発生し，農業生産に多大な影響を及ぼしている。そのため，作物の収量を維持するためには遺伝的に作物を改良することが必要不可欠である。作物の遺伝的改良には，植物を除雄し，交配し，雑種植物を獲得し，望む形質を持つ植物を選抜するなど多数の段階が必要である。この発表では，植物の遺伝的改良に関する最近の動向について議論したいと考える。

2. 生物の改良とは

地球上には非常に多様な生物が存在している。生物の基本構成単位は細胞であり，細胞内にはその生物の設計図であるゲノムが存在する。細胞の成長と共に複製されたゲノムは染色体に凝縮され体細胞分裂により，娘細胞へと正確に分配される。生物は次世代にゲノムを受け継ぐために，減数分裂によりゲノムの量を減らし，受精し，1 細胞から一生が始まる。ゲノムには遺伝子と呼ばれる生物の特性をコードする情報が多数含まれている。様々な生物はそれぞれの生息環境に適応した遺伝子をゲノム上に持ち，この違いが生物の多様性を生み出している。人類は農耕や畜産などの分野で，植物や動物の多様性を利用してきた。これらの生物は栽培が容易であったり，風味が良かったり，病気に強かったりと

有用な特性を持っている。近代においては，遺伝の法則や遺伝子の解明が進み，作物や家畜の改良は有益な遺伝子を一つの細胞（ゲノム）に集積することを目指すようになった。有用な遺伝子を集めるためには，A（美味しい）と B（病気に強い）の親を人為的に交雑させ，C（美味しい，病気に強い）を創り出す必要がある。植物の改良（植物育種）においては，異なる形質を持つ個体を交雑させ，次世代で優れた形質を持つ個体を選ぶことは非常に重要である。

3. 交雑による植物育種

私たちが日常的に摂取している作物は，多くの交雑と人間による選抜の結果である。生物は科，属，種などの似た特性に基づいて分類される。似た特性を持つ生物同士は比較的容易に交雑し，次世代の雑種個体を生み出すことができる。一方で，似た種同士の交雑は遺伝子の多様性が限られるという側面もある。そのため，より新しい遺伝子を導入するためには，一般的には交雑が難しい異なる種間や属間での交雑が行われる。

例えば，パンコムギの近縁種であるオオハマニク (*Leymus racemosus*) との交雑によって，生物的硝化抑制 (BNI) 効果をパンコムギに導入し，窒素肥料必要量の削減に成功した (Subbarao et al., 2021 ; Subbarao et al., 2007)。この BNI コムギは一般的なコムギよりも窒素肥料の必要量が低いことから，温室効果ガスの排出や水質汚染を低減し，生産性を向上させつつ，地球温暖化の緩和に貢献することが期待される (図 1)。また，パンコムギに近縁野生種であるタルホコムギを多数交雑した系統群からは，スーダンなど中央アフリカ地域の厳しい乾燥や高温の環境に耐える事ができる，新たなコムギ系統の作出が可能になりつつある (Gorafi et al., 2018)。このように，異なる種との交雑は作物の多様性を広げ，これまでに存在しなかった特性を導入するために

*鳥取大学乾燥地研究センター (Takayoshi Ishii)

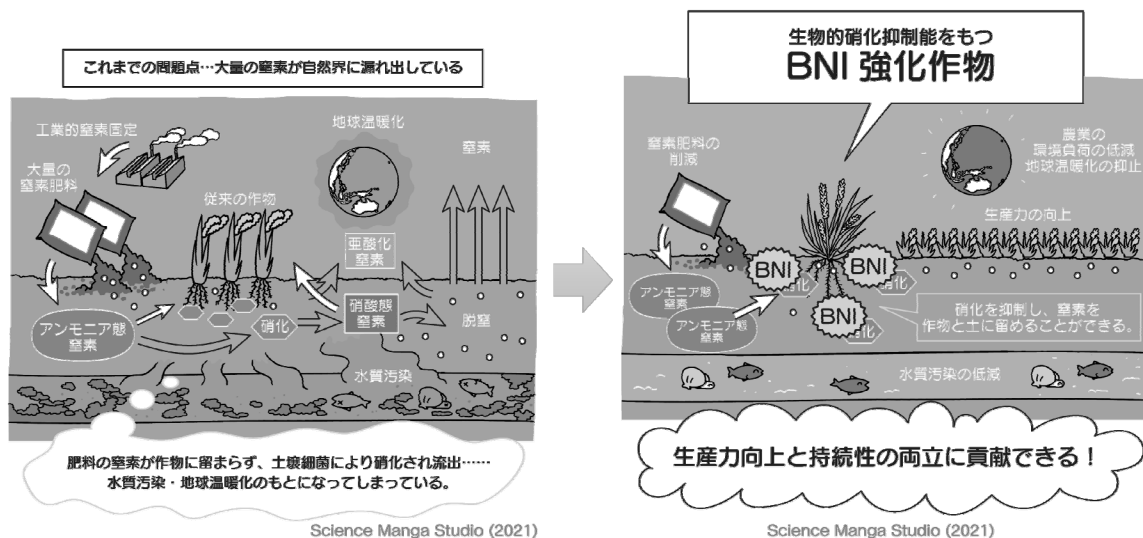


図1 BNI の概念図 (JIRCAS 図改変)

非常に魅力的な方法である。一方で、生物には交雑の限界がある事も知られている。

4. 交雑の限界

作物の多様性を広げるために、種間や属間などでの交雑が行われてきたが、生物は無作為にどのような組み合わせでも交雑できるわけではない。交雑の組み合わせには限界が存在することが知られている。交雑の過程には、多数の壁がある。花粉が発芽しない、受精が成功しない、受精しても雑種の発生に異常をきたすなど、さまざまな問題が生じる。これらの現象は、生殖的隔離機構や交雑障壁として知られている。イネ科植物では、亜科が異なる植物であっても、花粉を用いた交雑が可能な組み合わせがある。しかしながら、受精後の雑種細胞では片親の染色体が選択的に脱落する染色体脱落が起こることが知られている (Ishii et al., 2016; 石井, 2022) (図2)。染色体脱落の分子的な仕組みを解明し制御できるようになれば、これまで考えられなかった交雑育種が可能になるかもしれない。

5. 顕微授精法による交雑の限界突破

生殖的隔離機構を回避するための技術として、顕微授精法がある。顕微授精法は、受粉前の花の子房と葯(花粉)から卵細胞と精細胞をそれぞれ単離し、それらの雌雄配偶子を電氣的に融合させて受精卵

を生成し、それらの受精卵を培養して胚および植物体へと発育・再分化させる方法である (Okamoto, 2011)。この技術は、トウモロコシ、イネ、コムギなどで既に確立されている (Kranz and Lorz, 1993; Maryenti et al., 2019; Uchiumi et al., 2007)。顕微授精法を応用し、イネ (*Oryza sativa*) とパンコムギとの間で亜科間の雑種植物 (イネコムギ: *Oryzawheat*) を作成した (Maryenti et al., 2021) (図3)。イネコムギは初期の胚発生段階でイネの染色体が選択的に脱落し、核ゲノムはパンコムギのゲノムを保有する。一方、イネコムギの細胞質ゲノムであるミトコンドリアはコムギとイネのミトコンドリアからなる雑種であった (未発表)。イネコムギは野外で栽培が可能であり、乾燥地研究センターの砂地圃場で育て、農業形質の調査を行った。その結果、イネコムギは親のコムギとは異なる様々な形質が観察された。これは、雑種化した細胞質ゲノムとパンコムギの核ゲノムの相互作用が影響している可能性を示している。顕微授精法を用いて、イネ科の様々な組み合わせで雑種作成に取り組んでおり、まったく新しい作物を創り出す事が可能になるかもしれない。

6. 育種年限の短縮法

作物の改良は、交雑による遺伝資源の導入、その後の選抜などのステップからなり、通常1品種を創

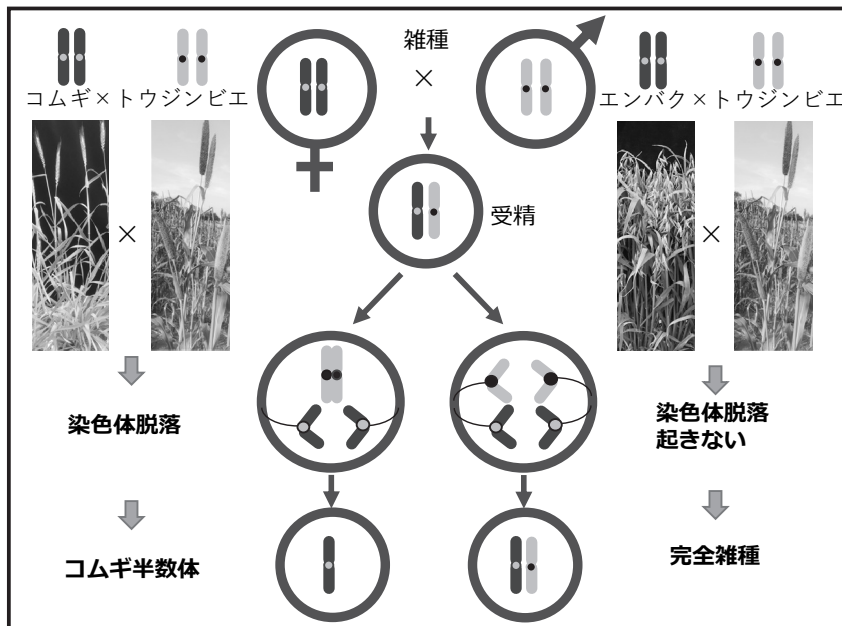


図2 イネ科亜科間交雑で起こる染色体脱落の概念図 (Ishii 2022, 育種学研究)

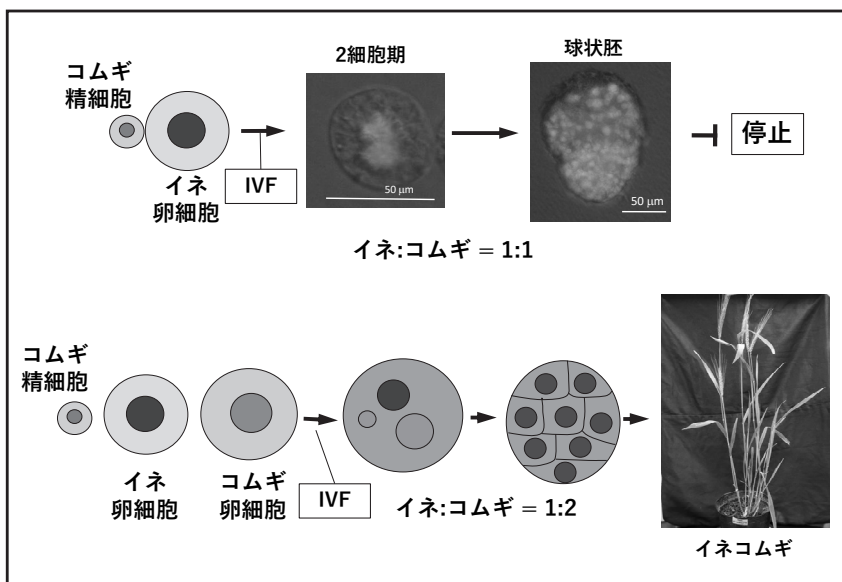


図3 IVF法によるイネコムギの作出 (Naryenti et al., 2021 改変)

出するまでには10年以上の時間必要な場合がある。気候変動に対応した作物の迅速な育成は非常に重要であり、これまでに育種にかかる時間を短縮する方法が開発されてきた。迅速育種法 (Speed Breeding) はコントロールされた環境を作りだし、

様々な種のライフサイクルを短縮し、育種年限を短縮する方法である。マメ科のササゲを用いた場合、1年間に理論的には8世代を栽培可能な方法が開発されている (Edet and Ishii, 2022)。その他にも、半数体の利用がある。半数体の創出方法には、半数体

の細胞を培養する手法や、交雑による染色体脱落を利用する手法などがある。近年では、遺伝子（動原体タンパク質など）を改変することで、人為的に半数体を生成する手法も報告されている。動原体を改変した植物を雌側として、改変していない系統と交雑させると、野生型ゲノムの半数体植物を得る事が可能である（Karimi-Ashtiyani et al., 2015）。この方法は、すでに複数の作物で実証されている。

7. 簡易な交雑に向けて

作物の改良には多数の交雑作業が必要になる。植物を交雑するためには、最初に除雄作業（花から葯の機能を取り除く作業）が必要である。これまでに、温湯除雄法、薬品法、細胞質雄性不稔法、手作業による方法など、さまざまな除雄方法が開発されてきた。しかしながら、これらの方法は特定の種や品種にしか適用できず、多大な労力と時間が必要であるという課題があった。筆者らは、一般的な試薬であるトリフルオロメタンスルホンアミド（TFMSA）を水に溶かし、植物にスプレーすることで、簡便に大量の植物を除雄することに成功した。TFMSA はこれまでに、イネ科であるソルガムやトウモロコシなどの単子葉植物でその有効性が確認されていたが、ササゲ（マメ科）、シロイヌナズナ（アブラナ科）、タバコ（ナス科）などの双子葉類植物でもそ

の有効性が実証された（Sekiguchi et al., 2023）（図 4）。この発見により、様々な植物の除雄作業の簡略化が実現し、TFMSA 法が植物の大量交雑手法の開発、交雑後に起こる植物の生殖隔離研究における基盤的な技術となる事が期待される。

8. おわりに

細胞は生物の基本単位であり、その中に存在する遺伝子を改変することによって生物の改良が行われている。科学の発展に伴い、ゲノム情報などの基盤的情報が整備されてきており、これに伴って植物の改良に関する基盤的な技術も進化している。しかし、農学は多岐にわたる学問領域の複合体であり、個々の研究者の力だけでは大きな成果を達成することは難しい。したがって、それぞれの研究者が持つ専門知識や強みを活かし、世界全体で持続可能な農業生産体系を提案することが現在強く求められている。私は植物細胞遺伝学者として、植物の最小単位である細胞を研究しているが、同時にその研究成果を実際の農業現場にも活かすことに注力している。新しい技術を導入することで、これまで地球上に存在しなかった植物を創出することは非常に魅力的であり、ワクワク感を抱いている。私たちが創り出す新しい植物が、実際の農業生産活動を支える一助となることを切に願っている。

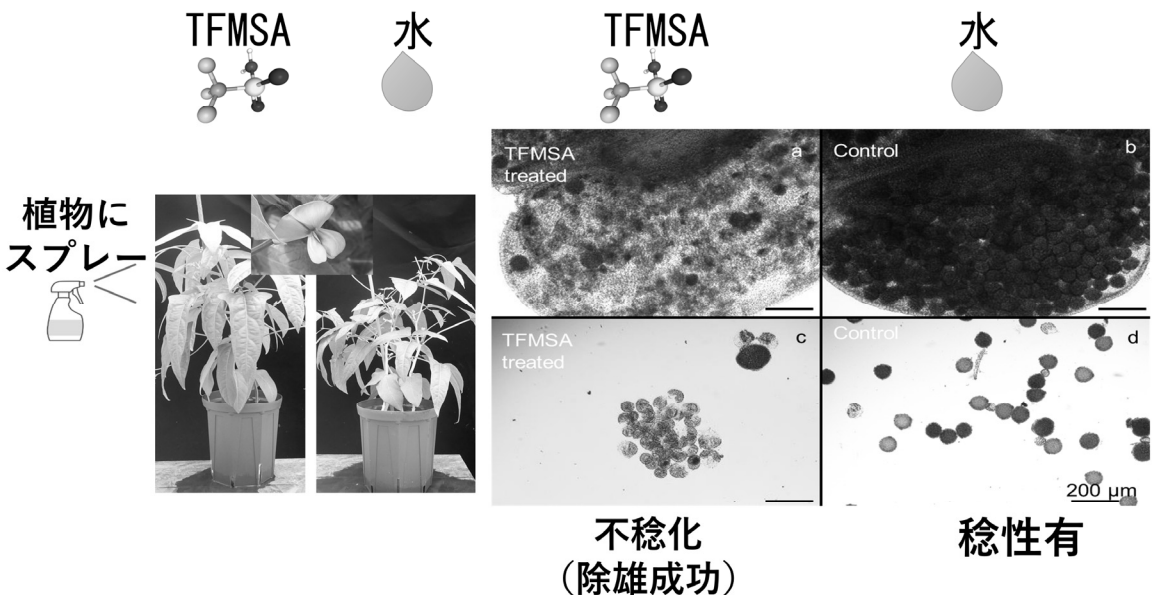


図 4 TFMSA によるササゲの葯の除雄法（Sekiguchi et al., 2023 改変）

引用文献

- Edet, O.U, and T. Ishii 2022. Cowpea speed breeding using regulated growth chamber conditions and seeds of oven-dried immature pods potentially accommodates eight generations per year. *Plant Methods*. 18.
- Gorafi, Y.S.A et al. 2018. A population of wheat multiple synthetic derivatives: an effective platform to explore, harness and utilize genetic diversity of *Aegilops tauschii* for wheat improvement. *Theoretical and Applied Genetics*. 131, 1615-1626.
- Ishii, T, R. Karimi-Ashtiyani and A. Houben 2016. Haploidization via chromosome elimination: means and mechanisms. *Annual Review of Plant Biology*. 67, 421-438.
- Ishii, T. 2022. 雑種胚細胞で起こる染色体脱落の理解と育種の利用. *育種学研究*. 24, 202-205.
- Karimi-Ashtiyani, R, T. Ishii et al. 2015. Point mutation impairs centromeric CENH3 loading and induces haploid plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 112, 11211-11216.
- Kranz, E, and H. Lorz 1993. *In-Vitro* fertilization with isolated, single gametes results in zygotic embryogenesis and fertile maize plants. *Plant Cell*. 5, 739-746.
- Maryenti, T. et al. 2019. Establishment of an *In Vitro* Fertilization System in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Cell Physiology*. 60, 835-843.
- Maryenti, T, T. Ishii and T. Okamoto 2021. Development and regeneration of wheat-rice hybrid zygotes produced by in vitro fertilization system. *New Phytologist*. 232, 2369-2383.
- Okamoto, T. 2011. *In vitro* fertilization with rice gametes: production of zygotes and zygote and embryo culture. *Methods Mol Biol*. 710, 17-27.
- Sekiguchi, Y, B.E. Ubi, and T. Ishii 2023. Chemical emasculation in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) and dicotyledonous model species using trifluoromethanesulfonamide (TFMSA). *Plant Reproduction*. 36, 273-284.
- Subbarao, G.V et al. 2007. Can biological nitrification inhibition (BNI) genes from perennial *Leymus racemosus* (Triticeae) combat nitrification in wheat farming? *Plant and Soil*. 299, 55-64.
- Subbarao, G.V et al. 2021. Enlisting wild grass genes to combat nitrification in wheat farming: A nature-based solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118. e2106595118.
- Uchiumi, T., I. Uemura, and T. Okamoto 2007. Establishment of an in vitro fertilization system in rice (*Oryza sativa* L.). *Planta*. 226, 581-589.