



特集2

OVERVIEW ■

植物の性は、雄しべと雌しべが共存する両性花を祖先に、雌・雄へと性別を分離して進化してきた。一方、栽培柿では一本の木の中に雄花・雌花の両者を着生し、まれに雄花から両性花へ先祖返りすることも知られている。性の揺らぎはなぜ起きるのか。岡山大学環境生命科学学域の赤木剛士研究教授は、果物の柿を通じて100年近く謎とされてきた植物の揺らぐ性の仕組みを明らかにした。そのメカニズムは、農業にとって重要な「作物の性別」を自由に制御できる技術への応用が期待されている。

100年に及ぶ植物の性の謎 解き明かし農業に生かす

赤木 剛士 Akagi Takashi

岡山大学 環境生命科学学域 研究教授
2020年よりさきがけ研究代表者

農学と生物情報学の融合 植物で初の遺伝子を発見

動植物は遺伝的な多様性を維持する仕組みとして「性」を持っている。動物は普通、1つの個体に雄雌どちらかの性を持つが、植物の性は、雄雌が共存する両性花のみを付ける両全性を祖先に、雄花だけを付ける雄木、雌花だけを付ける雌木に分離する雌雄異株として進化してきた。さらに、1つの木に雄花と雌花の両方が付く雌雄異花同株も混在するなど、多様な性を表現する。植物でなぜ、このよ

うに多様な性が表現されるのかは長年の謎であった。

植物の性に関する研究は1900年代初頭から始まった。植物の性も動物と同様に、性染色体で制御されていることが明らかとなり、さまざまな植物で性染色体が同定された。しかし、性決定の仕組みに関わる性決定遺伝子は100年近くわからず、植物の性を制御するメカニズムも仮説の域を出ないままだった。

植物で初めてとなる性決定遺伝子が発見されたのは、2014年のことである。OGI(雄木)、MeGI(雌木)と

命名された性決定遺伝子を発見したのは、当時京都大学で園芸学を専攻していた岡山大学環境生命科学学域の赤木剛士研究教授である。赤木さんは、海外特別研究員として渡った米カルフォルニア大学デービス校でバイオインフォマティクスの研究を進め、雌雄異株性のマメガキで性決定遺伝子を発見した。

カキ属はこれまでゲノム情報の蓄積が全くなく、遺伝地図も整備されていなかった。そこで、次世代シーケンサーと呼ばれるゲノム配列解析技術を使い、さまざまな観

点から解析し、性決定遺伝子のOGI、MeGIの発見に至った。同時に、Y染色体上の非翻訳small-RNAであるOGIが、MeGIによる雌化を食い止めることで、雄化を誘導するという、性決定のメカニズムを明らかにした(図1)。

「当時、植物の性決定遺伝子が発見されていないことは知りませんでした」と語る赤木さん。柿の多様な性の表現が栽培や育種などが農業上の問題だったことから、留学先での研究テーマに選んだという。「農学とバイオインフォマティクスを融合させることで、それまで見えてこなかったものが見えてくるのではないかと思います。アメリカでは全くの素人だったゲノム情報を扱う研究室に入りました。それが結果につながったと思います」と振り返る。

キウイの両性花を開発 自家受粉で生産性が向上

帰国後、京都大学で植物の性決定に関する研究を続けた赤木さんは、さきがけ「カキ属をモデルとした環境応答性の性表現多様化機構の解明」(15~18年度)に応募し、植物の性に関する研究をスタートした。キウイフルーツにおける2つの性決定

遺伝子「Shy Girl」
と「Friendly Boy」
の発見と、植物が性別を手に入れる進化の仕組みの解明も、研究テーマの1つである。

赤木さんは、これら2つの遺伝子が性別獲得の進化にどう関わるのかを遺伝情報学の観点から解析した。そして、もともと両全性だった個体から、Friendly Boy遺伝子を失ったものがX染色体となり、Shy Girl遺伝子を新しく獲得したものがY染色体となること、またその組み合わせにより、性別が決まることを解明した(図2)。

この発見は、1978年に提唱された二因子説という仮説を証明することにもなった。二因子説は、植物の性が両全性から性別を獲得する進化の過

図1 カキ属におけるOGI遺伝子(MeGI遺伝子系)による性決定の機構

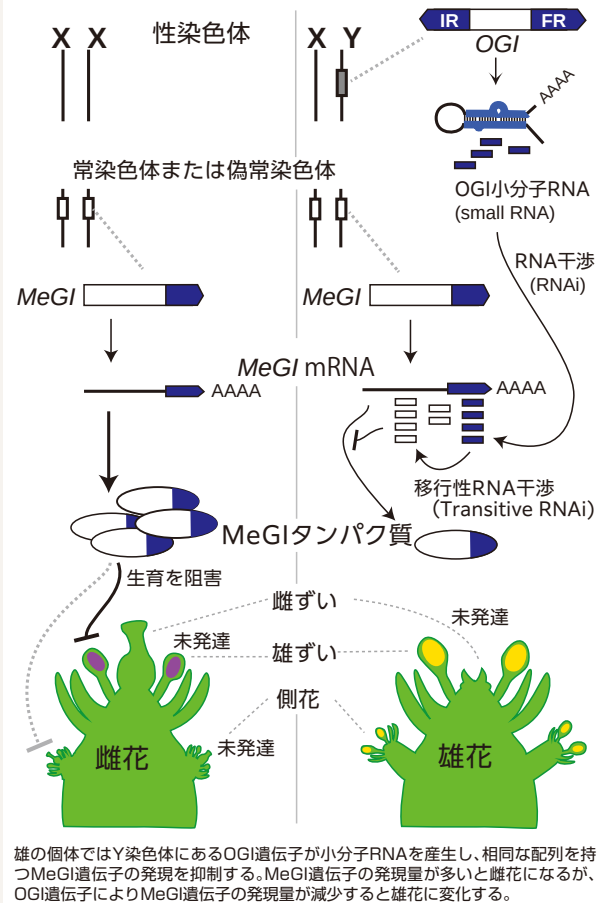
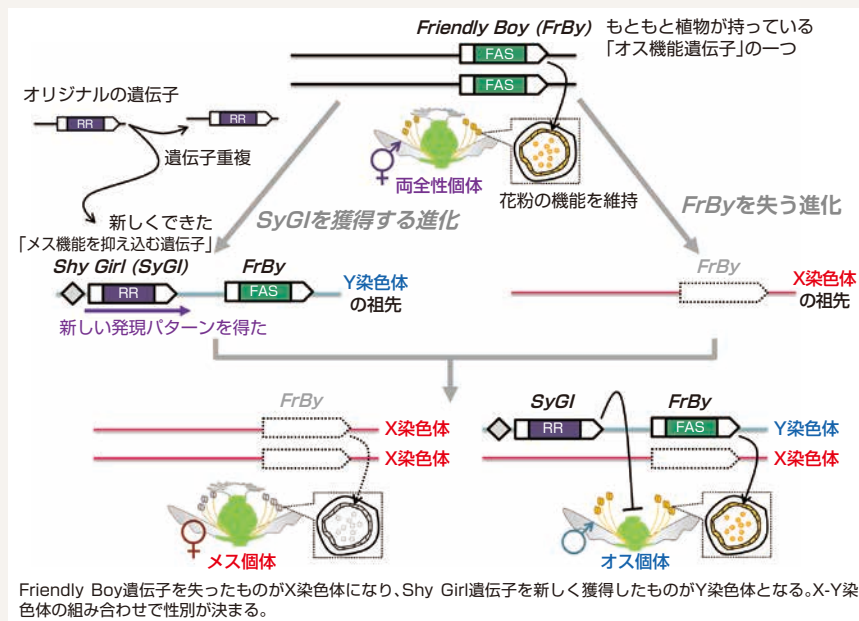


図2 キウイにおける性別獲得の進化



程は、まず雄を維持する遺伝子の変異により、X染色体ができる。さらに雌化を抑制する遺伝子が新規に誕生して、Y染色体が成立し、その結果、性別ができるというものである。Shy Girl遺伝子とFriendly Boy遺伝子の機能を明らかにするために、花に雌しべが無い雄木のShy Girl遺伝子を遺伝子編集で変異させ、雄の花粉がなくては果実を作らない雌木にFriendly Boy遺伝子を導入した。その結果、いずれも自家受粉により果実を付ける両性花を作することに成功した。

この成果は、農業界にも大きなインパクトを与えている。それまでキウイは雌雄それぞれの個体があり、受粉に必要な雄を雌の開花時期に合わせて育てなければならず生産性に影響を与えていた。しかし、性決定遺伝子のゲノム編集により、両性花のキウイが作られるようになったため、収穫率が向上したのだ。

ところで、植物の研究をするためには、実際にその植物を育てなければならぬ。しかし、通常の栽培種を一から育てると実が付くまでに時間がかかる。キウイも例に漏れず、結実まで6年近くを要するのが通常であった。そこで、Shy Girl・Friendly Boy遺伝子の研究では、ニュージーランドの共同研究者とともに、半年くらいで実がなる早咲きのキウイをゲノム編集により作ることから始めたという(図3)。

大量絶滅期にゲノム倍化 生き残りをかけた進化

植物の進化の中で、性決定遺伝子がどのように誕生したのかを解き明かすために、赤木さんらはマメガキで柿の全ゲノム解読を行った。そして、進化の過程で全ゲノム倍化を経験している痕跡を発見した(図4)。ゲノム倍化とは、遺伝子情報のワンセットであるゲノムが倍に増える現象である。全ゲノム倍化が起きた時期は約6000~7000万年前、地球に隕石が衝突した最終大量絶滅期と一致していることもわかった。つまり、柿の性決定遺伝子OGI、MeGIによる性別の分離は、ゲノム倍化により、カキ属で特異的に獲得された性質であることが解明されたのである。

「ゲノム倍化は特別なことではなく、常に非常に低い頻度で起きています。いわゆる突然変異です。ですの

で、大量絶滅期にゲノム倍化が一斉に起きたというより、隕石が落ちて普通なら生きられない環境で、ゲノム倍化した個体がたまたま生き残ったということです。ゲノム倍化や遺伝子倍化はその後繰り返されて、そのたびに進化に関わる大きなイベントが起きているのではないかと、そこが研究テーマとして興味深いところです」と赤木さんは語る。

1つの木に混在する雄花と雌花 植物の性の「揺らぎ」を解明

次に赤木さんらが研究を進めたのは、植物の性の揺らぎの解明だ。私たちが普段食べている栽培柿は、1つの木に雄花、雌花が混在しているが、まれに両性花が着くことがある。先祖返りにも見える植物の性の揺らぎはなぜ起こるのか。実は、性決定遺伝子が発見されたマメガキはヒトと同じ染色体が対になった二倍体の野生種で、雄木と雌木に分かれている。一方、栽培柿は六倍体で、一本の木に雄花と雌花が付く。六倍体の木に雌花と雄花が同時に着く仕組みは「エピソード」と呼ばれるDNAに書き込まれた記憶が制御していることを赤木さんらは

既に解明していた。

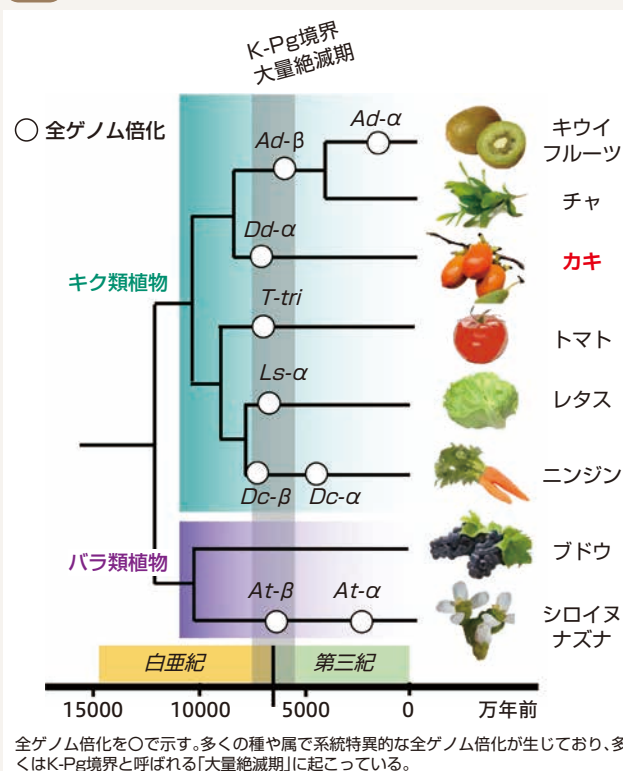
では、雄雌が混在する柿の木に、両性花が付くのはなぜなのか。赤木さんらは、遺伝子共発現ネットワーク解析という遺伝情報学の解析手法を用いて、両性花へ変化を促す働きを持つ新しい遺伝子「DkRAD」を発見した。DkRAD遺伝子は、サイトカイニンやアブシジン酸などの植物ホルモンの働きかけて、雄しべに雌しべを形成させ、両性花へと変化させる働きを持つことがわかった(図5、6)。もともと花弁の形に関わる遺伝子として知られ、性別の変化に関わる機能は、柿のみで発見された新しい働きである。

また、DkRAD遺伝子を介した両性花への変化は六倍体の栽培柿のみで起こる現象で、野生種の二倍体の柿では見られない。「以前から、ゲノム倍化が起こると性ができたり、逆に戻ったりするということ言われてきました。DkRAD遺伝子によって両性花が出来る仕組みは、一見、先祖戻りのようにも見えますが、実際には両性花から性が生まれて、また新しい進化を経て、両性花に変わったと考えられま

図3 研究室で栽培中の早咲きキウイ



図4 植物における進化過程での全ゲノム倍化



す」と説明する。研究テーマに掲げたように、進化によって植物の性は揺らぐということを見事に示した形だ。

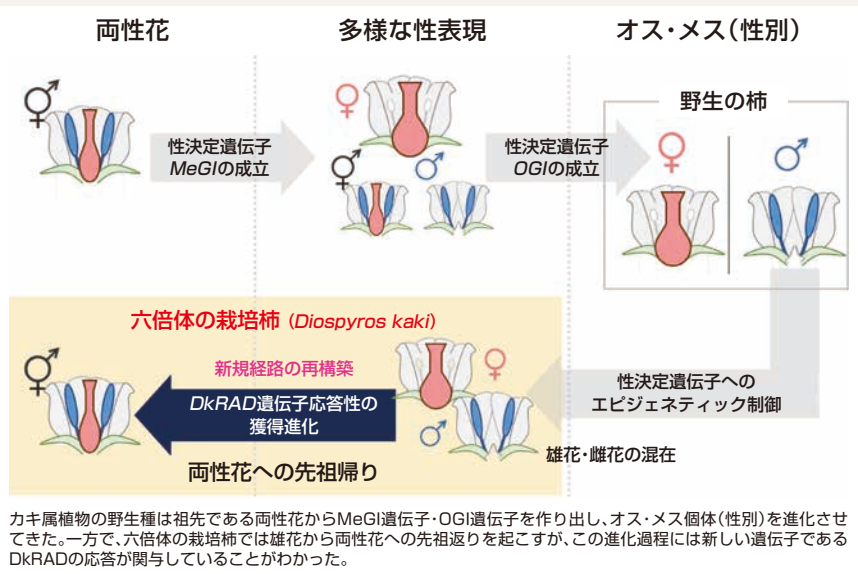
アドバイザーの一言が後押し 研究に「説明可能なAI」導入

植物の性の進化をテーマにさきがけ研究を進めてきた赤木さんだが、平行して農学とAIを融合させた研究にも取り組んできた。AI技術である深層学習を取り入れることで、トマトの全ゲノム情報をAIで解析し果実が熟れる際の遺伝子発現を予測する技術の開発に成功した(図7)。また、柿果実の内部障害を見抜く技術の開発は県の試験場やメーカーと提携して、社会実装が進められている(図8)。

研究にAIを取り入れるきっかけとなったのは、さきがけ研究のアドバイザーだった九州大学大学院システム情報科学研究院の内田誠一教授との出会いが大きいという。アメリカでゲノム情報を扱う研究室で研究に取り組んでいたときから、農学と情報学にAIを取り入れたいと考えていたが、「当時のAIは判断の過程がブラックボックス化していたため、躊躇していました。内田先生と出会い、説明可能なAIがあることを知り、一緒に研究をさせて頂くことになりました」と語る。

周囲からは「せっかく植物の性決定で成功しているのに、なぜAIをやるんだ」と言われることもあったが、失敗を怖れてはブレイクスルーを起

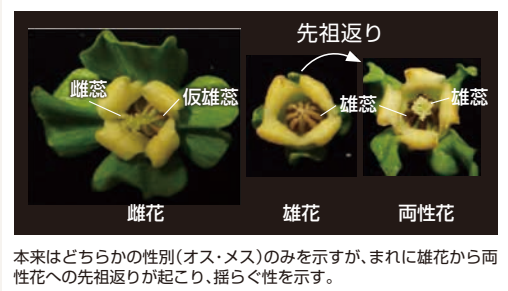
図5 柿の遺伝子進化による「植物の揺らぐ性別」の成立過程



こせない。「日本には過去の方法に積み重ねていくだけで、新しいことには、人が手を出すまでなかなか手を出さない人も多いように思います。しかし、今の情報学は更新スピードがとても早いので、手をこまねいていると手遅れになりかねません」と赤木さんは危惧する。

これまでの植物の性の進化に関わる研究により、植物は進化の過程でゲノム倍化、遺伝子倍化を繰り返して、それぞれの植物に独自の形質を作ってきたことがわかった。しかし、倍化によって新しい形質を駆動する新機能分子の大部分は未開拓のままである。そこで、赤木さんは、さきがけ

図6 栽培柿における両性花への先祖返り



の新たなテーマとして、ツツジ目果樹作物やトマトの進化に着目し、ゲノム倍化、遺伝子倍化により系統特異的に駆動する新規機能分子の探索する研究を進めている。さまざまな新機能分子の発見が、今後の農業の発展にも大きく貢献することだろう。

(TEXT:伊藤左知子, PHOTO:伊藤彰浩)

図7 温室で栽培中のモデル植物トマト「マイクロトム」



図8 深層学習による柿果実の内部障害予測モデルの構築

