

重イオンビームを利用した花卉園芸植物の育種

理化学研究所仁科加速器研究センター

平野 智也

私は平成 18 年に千葉大学大学院自然科学研究科博士課程を修了し、かずさDNA研究所、北海道大学を経て、理化学研究所に着任しました。在学中は植物細胞工学研究室で三位正洋教授に師事し、植物遺伝資源の長期保存法開発を研究テーマとし、主に日本のラン科絶滅危惧種を扱っていました。その後、学生時代に学んだ植物バイオテクノロジー技術を基盤として植物受精機構の解析や花卉園芸植物を含む植物、微生物、藻類の効率的な育種に向けて突然変異誘発技術の高度化研究を推進しています。本稿では、現在取り組んでいる重イオンビーム品種改良技術の花卉園芸植物への応用について紹介したいと思います。

重イオンビームを照射する

理化学研究所和光地区の地下には、巨大な加速器群が存在します(図1)。この施設は仁科加速器研究センターのRIビームファクトリー(RIBF)であり、原子核物理学において元素の起源を解明する研究を始め、多様な研究に用いられています。加速器とは、電子や陽子、原子が電子を失って出来るイオンといった荷電粒子を文字通り加速し荷電粒子ビームとして取り出す装置です。RIBFではサイクロトロンと呼ばれる加速器を多段式で使用することでウランイオンを光速の70%まで加速することが出来ます。ヘリウム以上の重い元素は重イオンと呼ばれることから、水素イオン(陽子)

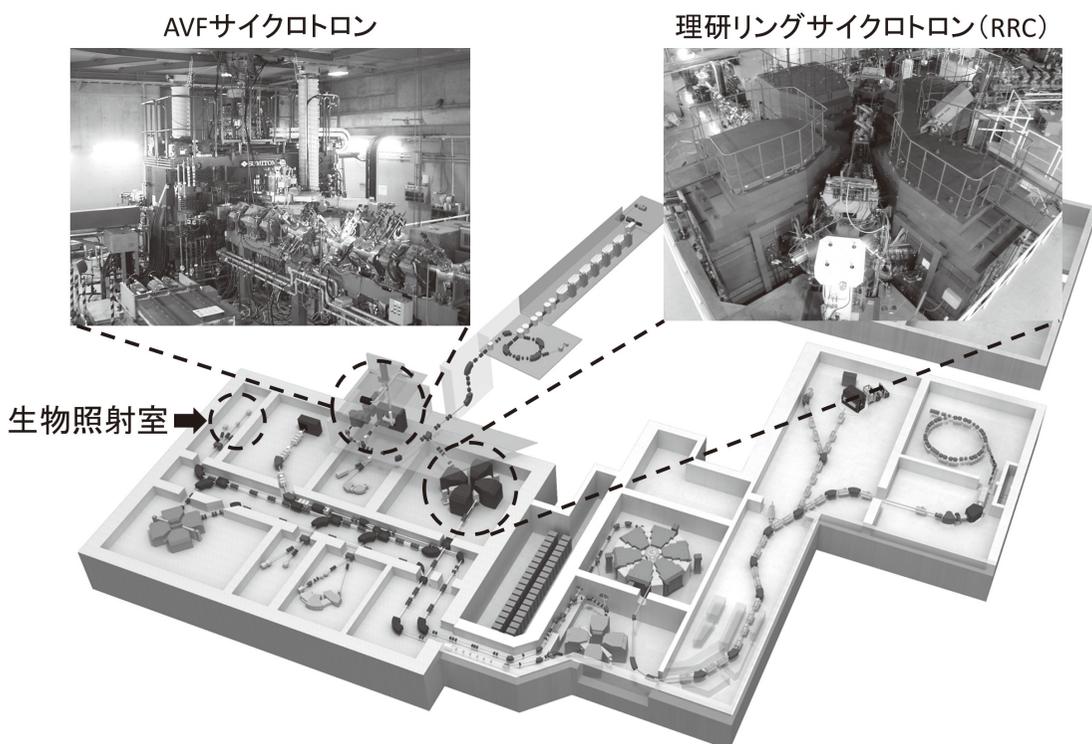


図1. 仁科加速器研究センターRIビームファクトリーの鳥瞰図

を含めた場合にはイオンビーム、ヘリウム以上のイオンに限定すると重イオンビームと呼ばれます。我々が生物学に应用する際には、AVFサイクロトロンと理研リングサイクロトロン(RRC)の2つの加速器を使い、炭素イオンであれば光速の40%程度まで加速したビームを利用します。現在植物への重イオンビーム照射には、炭素イオン、窒素イオン、ネオンイオン、アルゴンイオン、鉄イオンを加速して利用しています。

RRCから発生した重イオンビームは、E5Bビームラインを通り生物照射室に運ばれます。生物照射実験室には、生物自動照射装置(図2A)が整備されていて、自動試料交換装置上にシャーレや遠沈管、植物無菌培養容器、さらにジッパー袋やプラスチックケー

スに入れた穂木等を専用カセットに配置することで(図2B)、あらゆる試料に対応し、それぞれの試料ごとに条件を変えながら次々と重イオンビームを照射することが可能となっています。この装置により1時間あたりに約50個の試料(容器)に照射することが出来ます。9 cmシャーレであれば、シャーレ上にまんべんなくビームが照射されるため、多くの種子を入れるもしくは組織培養体を上手く配置することで照射個体数を稼ぐことも出来ます。このように様々な試料、容器に対応出来るのは、AVFサイクロトロンとRRCで加速されたイオンが高いエネルギーを持つ(炭素イオンであれば水中でも40 mm進む)からです。



図2. 生物自動照射装置

- (A) 自動試料交換装置上に配置した照射用試料は、照射位置まで運ばれる。
- (B) 自動試料交換装置上の照射試料。各プラスチックケース内には穂木が入っていて、1ケースずつ照射される。ケースごとに照射条件を変えて照射することが可能。
- (C) 照射位置の側面図。図中右側から伸びる円筒が真空ビームラインの末端で、ここから加速されたイオンがアルミ箔を通して空気中に出て試料に照射される。

突然変異の誘発

近年よく耳にするようになった重粒子線治療も重イオンビームを細胞に照射するという意味で品種改良と同じことをしていますが、がん治療の場合にはイオンをがん細胞で停止させ死滅させる、品種改良の場合には試料中でイオンを停止させることなく通過させて突然変異を誘発するという違いがあります。これはイオンが停止する付近で著しく高いエネルギーを放出するという性質を活かし、正常細胞は通過させてがん細胞でイオンを停止させ効率的にがん細胞を殺すというものです。突然変異誘発の場合には、細胞をなるべく殺さず、しかしDNAには傷をつけるというようにエネルギーを調節して照射を行っています。重イオンビームも放射線的一种ですが、従来突然変異育種に用いられてきたX線やガンマ線とは異なる性質を持ちます。

X線、ガンマ線は光の一種で細胞に照射すると細胞核内のDNA上に細かな傷を多くつける一方で、重イオンビームではイオンの飛程に沿って局所的にDNAに傷を与えます。局所的に損傷を与えるため、傷つける遺伝子数は少ないが、傷つけた場合には正確に修復することが難しい傷(DNA二本鎖の切断)を誘発します。この違いが重イオンビーム育種技術の利点である、高い突然変異率を示すが、目的とする形質を持った突然変異体を選抜した際に元々の有用形質を損なうこともしくは意図しない形質が付随することが少ないという特徴につながっています。

我々のチームでは、イオンの種類やエネルギーを調節することで突然変異率が上がる照射条件を明らかにし、さらに変異の種類や規模をコントロールすることが出来ることを明らかにしてきました。これらの条件をもとに、どのような植物を対象とするのか、例えば2倍体であるのか高次倍数性であるのか、またどのような変異を起こしたいのか、どのような遺伝子を破壊したいのかというように、目的に応じて使用する重イオンビームを選ぶことが可能になりました。重イオンビーム育種は「数撃ちゃ当たる」という時代を脱したと言うことが出来るかもしれません。

これまでに得られた突然変異体

我々のチームは、共同研究を通して重イオンビーム品種改良技術を様々な植物種に適用し、花色や花型、草姿等に関する数多くの突然変異体を作出してきました。花葉29号「ホトギスとの出会い」の項で中野優博士が紹介された矮性変異体もこのうちの一つです。2002年に初の市販品種が登録されて以来、27品種を作

出してきました。花卉園芸植物において得られた変異体をいくつか紹介します。

・ *Verbena × hybrida*

サントリーフラワーズでは、花手毬シリーズの培養苗に窒素イオンビームを照射して変異体選抜を行うことで、不稔系統を得ています。不稔になることで花房数が増加し、種子形成による株の老化が抑制され、開花特性が向上しました。特筆すべきは、親とした品種の有用形質は損なうことなく不稔形質のみを導入出来て、変異系統がそのまま品種として使用できたことです。これは前述した重イオンビームのエネルギーを与える特性が局所的であり、傷つける遺伝子が少ないということを体現していると思われます。

サントリーフラワーズでは、バーベナの他にも重イオンビーム育種技術を用いてペチュニアやトレニア、サイネリア等の新品種育成に成功しています。これらの功績が認められ、サントリーフラワーズの鈴木賢一博士、理研の阿部知子博士、福西暢尚博士は、第7回「産学官連携功労者表彰 文部科学大臣賞」を受賞しています。我々は、研究成果の展示として毎年和光地区にこれらの市販品種を用いた円形花壇を作っています(図3)。

理研見学にいらっしやる機会があれば是非ご覧下さい。



図3. 理研和光地区の重イオンビーム品種改良技術を用いて育成された品種を集めた花壇

・ *Cerasus*

JFC石井農場では、サクラの穂木に炭素イオンビームを照射することで新品種育成に成功しています。緑色の花を咲かせる‘御衣黄’に照射し変異選抜を行うことで、花卉の緑色部分が少なくなり全体として淡黄色になる変異系統が得られました。この変異形質は安定していることが確認されたことから、‘仁科蔵王’として品種登録されました。「仁科」は我々のセンター名にもなっていて現代物理学の父である仁科芳雄博士に、「蔵王」は山形県で育種したことに由来していて、理研の野依良治理事長によって命名されました。

山形13系敬翁桜に照射して得られた変異系統から、花はピンク色の一重咲きで親系統と変わりませんが低温要求性が低下した系統が得られました。この変異系統は‘仁科乙女’として品種登録され、温室であれば連続的に開花する四季咲き性を示し、野外であれば春と秋の二季咲きとなる特徴を持ちます。また低温処理後の4月に一斉開花させると花の量は元品種のおよそ3倍になります(図4)。「仁科乙女」は2014日本フラワー&ガーデンショウのF&Gジャパンセレクションにおいて、新花コンテスト・公益社団法人園芸文化協会会長賞を受賞しました。「仁科蔵王」、「仁科乙女」のいずれも、照射から品種登録までにわずか4年と先述したバーベナも含め育種年限は非常に短いものとなりました。仁科シリーズとして、「春月花」に照射を行い大輪となった「仁科春果」、照射後交配を経てぼんぼり咲きとなった「仁科小町」が加わっています。



図4. 4月に一斉開花した仁科乙女(左)と山形13系敬翁桜(右)

・ *Chrysanthemum*

輪菊、スプレーギク、小菊における重イオンビーム品種改良は、品種のシリーズ化やある形質のみを変えるピンポイントの改良を目的に、公立試験場が中心となり現在も盛んに行われています。兵庫県では、赤紫色の小菊品種‘紅椿’に炭素イオンビームを照射し、濃桃色および赤色の変異体が得られました。これらの変異体に再度照射を行うことで花色のバリエーションが広がり、橙色、黄色も得られています。鹿児島県では、同県育成のスプレーギク品種‘サザンチェルシー’に炭素イオン、ネオンイオン、アルゴンイオンビームを照射することで花色変異体を得ています。‘サザンチェルシー’が桃色であるのに対し、変異体では白色、薄桃色、濃桃色、薄樺色、濃樺色、黄色と幅広い花色

が見られました。‘紅椿’および‘サザンチェルシー’の花色変異体群は、アントシアニン生合成系とカロチノイド生合成(分解)系の変異が組み合わさったものと考えられます。

キクのような高次倍数性植物は遺伝子セット(コピー数)が多いため、遺伝的にヘテロ性が高いとは言え、一つの遺伝子を壊しても他の遺伝子が機能を補い変異体としての表現型が見られないことが多々あります。このような場合には、‘紅椿’で行われたように複数回の照射が有効と考えられます。また、アルゴンのように重いイオンは、巨大な欠失や染色体再編成を引き起こすことが明らかになっていますので、染色体の構造を変化させるような変異が有効なのかもしれません。実際に‘サザンチェルシー’では、炭素イオン、ネオンイオンビームに比べて、アルゴンイオンビームが最も広い花色変異幅を示しました。高次倍数性植物における変異の詳細は、現在研究が進められています。

これからの重イオンビーム品種改良技術

近年、狙った遺伝子の機能を改変するゲノム編集技術が注目されています。花卉園芸植物では、遺伝子組換え実験系が整備されていて、かつ全ゲノム配列が解読されているもしくは標的とすべき遺伝子の機能が解明されている植物種は非常に少ないというのが現状です。従って、一つの遺伝子を狙い打つことは出来ませんが、あらゆる生物に適應できる重イオンビーム品種改良技術は、今後も花卉園芸植物を含めた植物育種に大きく貢献できると考えています。

花卉園芸植物のゲノム情報が明らかとなり、重イオンビーム照射で得られた有用な変異体の解析が進めば、ゲノム編集技術で標的とすべき遺伝子の情報が実用植物においても蓄積されることとなりますので、将来の花卉園芸植物の育種に非常に有益と考えられます。これまでに多くの植物種に重イオンビーム照射を行って来たことで独自のノウハウを蓄積してきましたが、種ごとに反応性が大きく異なり、また品種間差も存在します。これらの現象は、植物種ごとの形態的、組織学的な違いや遺伝的背景の違いによるDNA修復タンパク質の量的、質的な差、ゲノムサイズの違い等、様々な要因が絡み合った結果と考えられます。

我々のチームでは、こういった問題に対応できるように重イオンビーム照射が植物に与える影響を精査し、品種改良技術の更なる高度化を進めていきたいと考えています。