

## 3. 応 用

## イオンビームの育種利用の現状と展望

日本原子力研究開発機構 長谷 純宏

## 1 諸 言

日本原子力研究開発機構（旧日本原子力研究所）では、1991年に世界初の材料・バイオ研究専用施設として現在の高崎量子応用研究所に設置されたイオンビーム照射施設(TIARA)を利用して、イオンビームの生物影響ならびに突然変異を利用した植物や微生物の新品種開発に関する研究を行ってきた。イオンビームの生物利用に関しては、日本国内では、理化学研究所、若狭湾エネルギー研究センターおよび放射線医学総合研究所の照射施設を利用した研究も行われているが、本稿では TIARA での事例を中心として、これまでの成果と現状ならびに今後の展望について述べる。

## 2 イオンビームによる突然変異の特徴

ガンマ線などを利用した植物の突然変異育種は、日本では 1960–70 年代にかけて盛んに研究が行われ、黒斑病耐性のナシ「ゴールド二十世紀」や短稈のイネ「レイメイ」などの血を受け継いだイネの品種などが現在の生活に受け入れられている。突然変異を誘発する手段として最も広く用いられてきたものはガンマ線である。我々は、ガンマ線に加えて新たな変異原を利用することは変異創出の幅を拡大できる可能性があると考え、イオンビームの生物利用研究を開始した。電磁波であるガンマ線が照射材料に対してほぼ均一にエネルギーを付与するのに対し、粒子線であるイオンビームは飛跡に沿って局所的にエネルギーを付与することが特徴である。研究を開始した当時、イオンビームがガンマ線に比べて線量あたりの致死効果が高いことは既に知られていたが、誘発される突然変異や形質に関する知見はほとんど無かった。従って、ガンマ線に比べてイオンビームによる突然変異にはどのような特徴があるのかを明らかにすることが当面の焦点であった。日本の突然変異育種の草分け的存在である農業生物資源研究所放射線育種場との共同研究で、ガンマ線とイオンビームでは得られるキクの花変異の種類が異なるという結果が示され、また、それらの変異系統が

イオンビームを使って作出された品種として初めて品種登録出願された<sup>1)</sup>。その後、キリンビールと共同で行ったカーネーションでの研究においても、ガンマ線、エックス線および化学変異剤 (EMS) に比べて、イオンビームが最も幅広い変異が得られることを示した<sup>2)</sup>。これをきっかけとして、「イオンビーム育種」による実用品種開発が一気に広がった。また、これらの応用研究と並行して、突然変異の特徴がモデル植物シロイヌナズナで調査され、電子線に比べて、逆位や転座などの染色体の再編を起こし易いことなど、突然変異の特徴が分子レベルで異なることが実証された。これらの結果から、(1) 突然変異率が高い、(2) 変異の幅が広く、新しい形質が得られる可能性がある、(3) 極低線量で変異を生じるため、付随変異を伴いにくく、目的形質のワンポイント改良に適しているというイオンビーム育種の特長が見えてきた<sup>3)</sup>。

## 3 イオンビーム育種による実用品種育成

現在までに花卉（かき）類を中心として 34 品種/系統が TIARA のイオンビームを利用して作出された。特にカーネーションやキクは、市場規模でそれぞれ年間 10 億円を超える経済効果をもたらした。2012 年に発表されたカドミウムをほとんど吸わないコシヒカリは、イネの 1 つの遺伝子に変異が生じたものであり<sup>4)</sup>、収量や味にはコシヒカリとの相違はみられない。日本人のカドミウム摂取量の約 4 割を占めるとされるコメへのカドミウム蓄積を解決する切り札として、今後、日本人の生活に陰ながら大きな利益をもたらすものと期待される。イオンビームがワンポイント改良に適していることを活用し、変異体への再照射・再々照射による品種育成も実用域に達している。今年度育成された白輪ギク品種「C241」および「C266」は、計 2 回または 3 回の変異誘発によって、低温開花性、切り花の品質および花もちに優れた系統を選抜したものであり、全国的な普及拡大が期待される。一方、麹菌や酵母において酵素活性の高い菌株が得られた事例をきっかけとして、産業微生物への利用が近年増加している。TIARA のイオンビームを利用した実用化例としては、吟醸香の主成分であるカプロン酸エチルを高生産する清酒酵母「群馬 227 酵母」を利用した日本酒の販売が挙げられる。また、日本国内だけではなく、日本が主導する原子力平和利用協力の枠組みであるアジア原子力協力フォーラム (FNCA) の放射線育種プロジェクト

Current Status and Future Prospects of Ion Beam Breeding  
Yoshihiro HASE (Japan Atomic Energy Agency),  
〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233  
E-mail: hase.yoshihiro@jaea.go.jp

において、アジアの10ヶ国が参加してイオンビームを利用したイネの育種を実施しており、最も進んでいる国では作出された新品種の実用栽培が開始されている。必ずしも全ての研究が実用化に結び付く訳ではないが、過去20年近くの間でこれだけの実用品種が得られたことは、イオンビーム育種が有用であることを明確に示すものである。

#### 4 外部利用制度による利用の広がり

イオンビーム育種は、各県の試験場や大学、種苗会社などとの共同研究として知見が積み重ねられてきた。TIARAでは当初より外部利用制度も設けていたが、ある程度の専門知識や利用経験がなければ実際に利用することは困難であった。高崎量子応用研究所では、2007年度から「明日を創り、暮らしを守る量子ビーム利用支援事業」として施設の外部利用者への支援体制を整えてきた。その結果、興味があってもどのようにしてイオンビームを利用すればよいのか、きっかけがつかめなかった園芸作物の生産者などが、イオンビームを利用してオリジナル品種の開発を進める動きが加速している。今年度、本事業の3件の利用者が花卉の実用品種育成に成功し、花卉類のイオンビーム育種については一般に利用できる技術になりつつあることを示している。イオンビーム育種に対する産業界からのニーズは強く、公的研究機関としてはこれまでの研究蓄積を社会に還元するためにも、今後も技術的なサポートに加えて、利用料金や知財に関しても利用しやすい制度を整備し、継続的に提供する必要があると思われる。

#### 5 突然変異はどこまで制御できるのか？

「突然変異の魅力は何か？」という問いに対し、上述したイオンビーム育種の3つの特長に加えて、基本的にどのような生物種にも適用可能であることや予想していなかった形質が得られる可能性があることが挙げられる。突然変異育種の多くは、1つあるいは極少数の遺伝子を不活化することによってなされるものであり、この性質上、用いる材料を選定した段階で、得られる変異の幅がある程度限定される。したがって、突然変異は偶然性に依存する部分が多い技術であるといえ、これが魅力でもあり欠点でもある。ここをもう一歩先に進めるため、現在の研究開発では、一般にランダムに起きると認識されている突然変異をどこまで制御できるのかを焦点としている。突然変異を制御する手段としては、エネルギーや核種などのイオンビームの特性による誘発変異の制御、ならびに目的の変異が得られやすい材料の選択などの生物側の制御が考えられる。

イオンビームと一口に言っても、速度や核種によってその特性は様々であり、単位長さあたりに付与するエネルギー量を示す線エネルギー付与(LET)がイオン

ビームの特性を示す指標として最もよく利用される。イオンビームの生物効果に関して多くの知見が蓄積されている動物細胞では、概してLETが高くなるに従って全欠失などの大規模な変異の割合が増加することが知られており<sup>5)</sup>、植物においても同様な傾向にあることが報告されている<sup>6,7)</sup>。このように、用いるイオンビームの特性によって、変異の規模をある程度制御することが可能である。誘発する変異の規模を使いこなすには更なる研究が必要であるが、遺伝的な重複が多い植物種や変異が得られにくい材料に対して大規模な変異を誘発することなどが効果的な使い方として考えられる。

生物側に関しては、目的とする変異形質に関わる遺伝情報を把握できていれば、遺伝子の不活化によって目的の変異体を得られる可能性を判断できるし、変異が得られやすい材料を選択することも可能だが、実際の育種現場ではこのような事例は多いとは言えない。遺伝情報が判らないなりに、目的形質に関わる変異を得られやすくすることはできないだろうか。我々は、ショ糖を与えて色素合成を促進させたペチュニアの幼苗にイオンビームを照射することによって、花色変異体の出現頻度を特異的に高められることを示した<sup>8)</sup>。また、イオンビームを照射したキクの花弁と葉の培養物を比較した結果、照射した組織からの植物体の再生率や再生した植物体の草丈には差が見られないにも関わらず、花色変異体の出現頻度は花弁の方が有意に高かった<sup>9)</sup>。これらの結果は、突然変異は全ての遺伝子に一律に起きるものではなく、植物組織の状態によって個々の遺伝子の変異率が変化する可能性を示唆するものである。現状では、なぜ組織の状態によって花色変異の頻度が変わるのか、他の植物種でも同様な現象が見られるのかは不明である。もし特定の形質に関わる遺伝子の突然変異を高頻度に誘発するという制御が可能であれば、新品種の育成に有用であるだけでなく、自然環境に適応した遺伝子変異が蓄積するといった生物の進化にも関連する非常に興味深い現象である。

#### 6 イオンビームでなければならないのか？

これまでのイオンビーム育種利用研究を振り返り、「イオンビームでなければならないのか？」を改めて考えてみたい。世界的に見ればイオンビームを利用できる施設は少ない。多少効率は悪くてもガンマ線その他の手段で同じことができるのであれば、必ずしもイオンビームを利用する必要はないし、イオンビームでなければならないことがあれば、高い費用をかけても利用する価値がある。

電離放射線による突然変異のほとんどは遺伝子の機能を不活化するものである。ある変異形質に対して1つの遺伝子の変異が対応しているとすれば、いかなる手段であっても対象となる遺伝子を不活化することさえできれば、目的の変異形質を得ることが可能であ

る。しかしながら、目的形質以外に生育抑制や品質低下などの付随変異が発生してしまうと、実用品種として利用することは困難になる。イオンビームは飛跡に沿って局所的に大きなエネルギーを付与するため、極めて限定された領域に変異を誘発することが可能であり、付随変異の発生による遺伝情報の損失がガンマ線やエックス線に比べて少ない<sup>10)</sup>。その結果、再照射や再々照射によって段階的に形質を改良することも可能であり、高い品質が求められる作物でのワンポイント改良では、イオンビームを使う価値があると言える。

また、上述したように、キクやカーネーションでの花色変異に関して、イオンビームでは他の変異原では得られない変異形質が得られることが示されている。これはイオンビームでなければならぬ大きな根拠の1つであるが、なぜ変異の種類が異なるのかについては未だに十分な説明がなされていない。繰り返すことになるが、ある変異形質が1つの遺伝子の変異によってもたらされるとすれば、変異原の種類によって得られる変異形質の種類が異なる現象は説明し難い。しかし、イオンビームでは逆位や転座などの染色体の再編が起こり易いと考えられ、この結果、1つや2つの遺伝子だけではなく、ゲノム全体として遺伝子の発現が変化したという説明は可能である。染色体の再編は、他の系統との交雑が不可能になるなど品種改良に不都合な場合があり、現状では好ましい変異とは思われていないが、染色体の再編によってゲノム全体にどのような影響があるのかを詳しく調べることによって、イオンビームの新たな活用方法が生み出される可能性がある。

## 7 おわりに

近年、特定の遺伝子を人工的に改変するゲノム編集技術の開発が進んでいる。汎用性やパブリックアクセプタンスの面から一般に利用できるツールになるには

まだ年数が必要と思われるが、不活化したいターゲット遺伝子が特定されていれば、狙って変異体を得ることや逆にランダムに遺伝子変異を起こすことも将来的には可能になるとと思われる。一方、イオンビーム育種は、基本的にどのような生物種にも適用可能であることや新しい変異形質が得られる可能性、染色体の再編などの特徴的な変異を起こせることなどから、産業界のニーズは今後も絶えないと思われる。イオンビーム育種は応用研究として実用の域に達している一方、イオンビームで生じる突然変異については未解明な部分が多く残されている。イオンビームの生物利用研究を進めてきた研究グループとしては、イオンビームでなければならぬのかに答える必要があり、応用研究に偏らず、イオンビームで生じる突然変異に関する未解明な部分を明らかにする必要があると考えている。

## 〈謝 辞〉

本稿に記載した内容の一部は、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「戦略的オミクス育種技術体系の構築」の助成を受けたものです。

## 〈参 考 文 献〉

- 1) S. Nagatomi *et al.*, Institute of Radiation Breeding, Technical News No. 60 (1997).
- 2) M. Okamura *et al.*, Nucl. Instrm. Meth. B, 206 (2003) 574.
- 3) A. Tanaka *et al.*, J. Radiat. Res., 51 (2010) 223.
- 4) S. Ishikawa *et al.*, PNAS 109 (2012) 19166.
- 5) F. Yatagai, Biol. Sci. Space 18 (2004) 224.
- 6) T. Hirano *et al.*, Mutat. Res., 735 (2012) 19.
- 7) Y. Hase *et al.*, Mutat. Res., 731 (2012) 41.
- 8) Y. Hase *et al.*, Plant Biotechnol., 27 (2010) 99.
- 9) M. Okamura *et al.*, Euphytica 202 (2015) 333.
- 10) 上野ら, 園芸学研究 12 (2013) 245.