

若狭湾エネルギー研究センターの地域に根ざした イオンビーム育種研究

高城 啓一 (*Takagi Keiichi*)

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センターは、多目的のイオン加速器を中心設備として備え、このイオン加速器を用いて、粒子線がん治療にかかる基礎研究、各種材料分析、人工衛星搭載機器の宇宙線耐性試験や、その周辺技術開発研究等を実施しており、イオンビーム照射を用いた生物の品種改良研究（イオンビーム育種研究）もそれらイオン加速器を用いた研究の1つである。

本稿は、加速器システム、イオンビーム育種の特徴を概説した後に、筆者らがこれまでに実施してきたイオンビームによる品種改良研究の中で、特に地元福井県との関わりが大きい事例を3例紹介する。

2. 多目的加速器システム W-MAST

筆者らの加速器システムは、200 kV マイクロ波イオン源イオン注入装置、5 MV タンデム加速器、シンクロトロンの3つの加速器とタンデム加速器、シンクロトロンに接続された7つのビームラインで構成され、若狭湾エネルギー研究センター多目的シンクロトロン・タンデム加速器システム（W-MAST）と呼ばれている（図1）。

5 MV タンデム加速器には、5つのビームラインが直接接続され、RBS, ERDA, PIXE 等のイオンビームによる元素分析等が可能となっている。

シンクロトロンは、タンデム加速器で加速された水素（陽子）、炭素、及びヘリウムイオンを大気中に取り出して利用可能なエネルギーまで加速する。

シンクロトロンには2つのビームラインが接続されており、大気中に取り出したイオンビームを用い

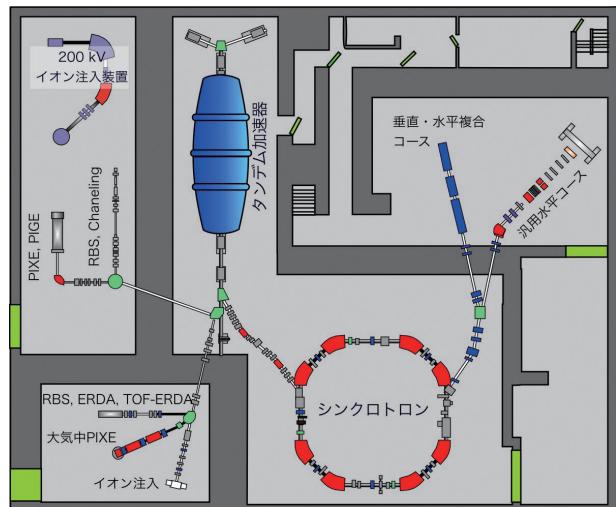


図1 若狭湾エネルギー研究センターの加速器システムの模式図

て、人工衛星搭載機器の宇宙線耐性試験や、陽子線がん治療の基礎研究、そしてイオンビーム育種研究に用いられている。育種には陽子ビーム、及び炭素ビームを用いており、飛程の短い炭素ビームを利用する際に試料調製が容易になるよう、垂直方向への炭素ビーム照射が可能なビームラインが整備されている。

3. イオンビーム育種の特徴

イオンビームは、ブレーキピーコーを持つ、原子番号の大きなイオンビームが高い線エネルギー付与（LET、通常 $\text{keV}/\mu\text{m}$ という単位で表記）を示す、という他の電離放射線には無い特徴を持つ。

LETとは、荷電粒子が一定距離進む間に物体に与えるエネルギーである。図2は、マウス纖維芽細胞株を照射した時に照射30分後に細胞核中に生じるDNA二本鎖損傷（DSB）を、 γ H2AXというマー

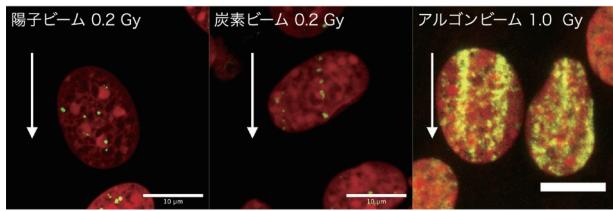


図2 LETの異なるイオンビームがマウス纖維芽細胞核上に形成した γ H2AX foci

カーを用いて可視化した写真である。低LET($0.45\text{ keV}/\mu\text{m}$)の陽子ビームではDSBは核内に散発的に形成される。一方、約130倍大きいLET($60\text{ keV}/\mu\text{m}$)の炭素ビームでは、ビームの進行方向に沿って点線上にDSBが形成される。更に大きなLET($310\text{ keV}/\mu\text{m}$)のアルゴンビームでは、ビームの通過経路に沿って一直線上に密なDSBが形成される。

突然変異は、DNA損傷の誤修復によって形成される。高密度に形成された修復の難しいDNA損傷は、より複雑な突然変異をもたらすと考えられる。これまでにシロイヌナズナの全ゲノム解析を用いて種々の核種、LETのイオンビームによる変異形成を解析した研究結果を総括すると¹⁾、LETが高まるにつれ、1個のイオンが引き起こす突然変異の頻度が高まると共に、染色体再構成のようなより複雑な変異が増加することがわかっている。

このような特性から、LETの選択により、育種目的により適した変異の頻度を調節することや従来の方法では得難い突然変異を得ることが可能であると考えられている。

4. 福井に根ざした品種改良研究

筆者らはこれまでに様々な生物の品種改良を実施してきた。本稿ではこれらのうちに地元福井県に根ざした品種改良に関して3つの例を紹介する。

(1) 施設栽培用作物の品種改良

福井県は豪雪地帯であり日照時間が短いため、冬期の農業生産は難しい。そこで電源立地県であることを活かした植物工場や大規模ハウス栽培等、大規模施設園芸を推進しているが、閉鎖環境での栽培に適した作物品種はあまりなく、対応品種の開発が求められている。閉鎖環境に対応した品種開発は、従

来の栽培環境に無い独自の形質が必要とされるため、突然変異育種が育種法として適していると考えられた。そこで、筆者ら施設園芸に適した作物のイオンビーム育種を実施してきた。

閉鎖型の植物工場の主力作物はレタス等の葉物野菜である。植物工場では、生産性を高めるために生長が早く、短期に出荷できる品種が求められている。そこで、筆者らと大城閑教授（研究当時、福井県立大学）、福井シード（株）は、陽子ビームを照射したレタス葉片を不定芽誘導培地で培養し、葉片から再生した植物体の中から、植物工場環境下で生長性の高い変異体を選抜した。選抜した変異体は後代で形質の固定を図り、従来品種の80%の栽培期間で出荷可能な大きさに生長するレタスの開発に成功した。このレタスは、品種登録出願を行い登録が認められた（登録番号30629）。

施設園芸用品種開発は、中玉トマトについても実施した。大規模ハウス栽培を利用して栽培されている作物としてトマトがある。通常トマトを着果させるためには、受粉作業が必要であり、生産者は、何らかの方法で受粉作業をする必要があり、これがコスト上昇の一因となっている。受粉しなくても着果する品種は大玉や小玉のトマト品種は存在するが、中玉のトマトではそのような品種は開発されていなかった。そこで、筆者らと福井シード（株）は、中玉のトマトの種子に陽子ビームを照射し、変異体の中から受粉作業なしに着果するものを選抜することに成功した。このトマトについても品種登録出願を行い、品種登録されている（登録番号29070）。

(2) 酒米山田錦の品種改良

福井県は米どころとしてだけでなく、酒どころとしても有名である。酒造業者は、酒米品種として最も優れている品種山田錦の利用を望むが、山田錦は晩生の品種であり、福井県では収穫前の台風や気温が低下の影響で栽培が難しく、県外の農家から山田錦を購入せざるをえない状況にある。また、山田錦は脱粒性の高い（穂が稲穂から落ちやすい）品種であり、この性質が収穫量を低下させる原因となっている。そこで、福井県立大学の三浦孝太郎教授と筆者らは、久保田酒造合資会社の協力を得て、福井県でも栽培可能で脱粒性の低い山田錦の品種開発を行っている。

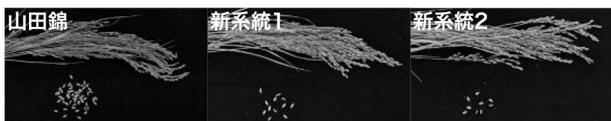


図3 山田錦の新系統

山田錦は穂を握ると多くの粒が脱粒する（左）が、新系統（中、右）ではあまり脱粒しない。新系統1は、およそ1週間、新系統2はおよそ2週間出穂がはやい

山田錦の種子に、炭素ビーム照射や化学変異剤による突然変異誘発を行い、後代から穂をつける時期が通常よりも早い早生系統群と、脱粒しにくい系統を選抜した。そしてこれらを交配することにより、早生かつ難脱粒性の山田錦系統を作り出した（図3）。作り出した系統を用いて日本酒醸造試験を行ったところ、醸造された日本酒は、山田錦を使って醸造した日本酒とほぼ同等の品質であった。これらの系統の内、1品種については品種登録出願中であり、福井県内の様々な地域で栽培可能とするため、穂の出る時期の異なる種々の早生系統を現在も開発中である。

（3）カニ殻分解細菌の改良

福井県といえば越前ガニが有名であるが、そのカニ殻は利用価値が低く、廃棄物として廃棄されるか、畑に埋めて肥料とするしかなかった。カニ殻の主成分のキチンは、N-アセチルグルコサミン（NAG）が重合した高分子多糖類であり、サプリメントのグルコサミンは、キチンを塩酸等で加水分解して生産されている。

福井県立大学の木元久教授は、福井県内の土壤からカニ殻を分解する細菌 *Paenibacillus sp.* FPU-7株を単離した。この細菌を用いれば、危険性が高く中和過程で大量の塩が発生する加水分解処理を用いずに、生物発酵を用いてグルコサミン（正確にはNAG）を安全で環境負荷が低い形で生産することができる。しかし、発見した菌体では工業的生産を行うには生産効率が低かった。そこで、木元教授と

筆者らはイオンビーム育種を用いてこの菌株の改良を試みた。

生産性が低くなるのは、この菌が分解産物であるNAGを自身の増殖のために摂取することが原因であると考えられたため、まず、陽子ビームを照射した菌の中から、NAGを菌体内に取り込まない変異体を選抜した。得られた変異体のキチン分解能力は、菌体内にNAGは取り込まないものの、分解効率は低く、これは増殖性の低下に起因することが分かった。そこで、更にこの変異体に陽子ビームを照射し、照射菌体の中から、高い増殖性を示すものを選抜した。その結果、カニ殻からNAGを生物発酵で工業生産可能な菌株の作出に成功した。

5. おわりに

筆者らは現在もイオンビーム育種を用いて、高温耐性イネ等種々の作物や真菌類、細菌類の品種改良研究を行っている。また、イオンビーム育種の効率を高めるための照射手法の開発研究も実施中である。

筆者らの加速器システムは、共同研究、依頼照射という2つの形態で一般利用が可能である。加速器の利用方法については、弊所ウェブサイトの加速器利用の項目（<https://www.werc.or.jp/outline/shisetsu/kasokuki/>）を参照されたい。特に品種改良についてはイオンビーム育種相談窓口（<https://www.werc.or.jp/ion/ionbreeding/index.html>）をご参照の上、お気軽に相談いただきたい。

参考文献

- 1) 高城啓一, 放射線生物研究, 58(4), 150-163 (2023)
((公財)若狭湾エネルギー研究センター 生物資源研究室)