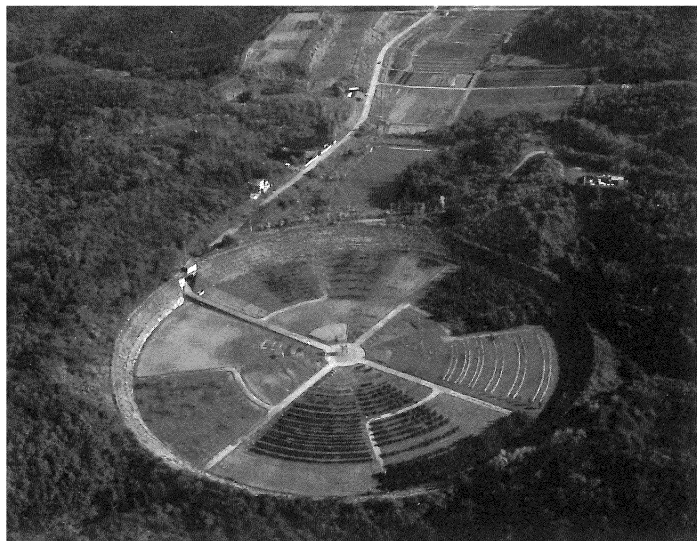




放射線育種の成果

前農業生物資源研究所放射線育種場長

山口 勲 夫

◀写真は放射線育種場の全景

1. 放射線による突然変異と放射線育種

放射線にはアルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線、X線などがあるが、放射線を照射する目的に使われるのはガンマ線及びX線である。ガンマ線やX線は電磁波の一種であり、可視光線や紫外線より波長が短くエネルギーが大きいため、透過力が大きく、医療用に用いられるX線はこの透過力を利用したものである。ガンマ線はX線より遙かにエネルギーが大きく生物に対する影響も大きい。

^{60}Co などは大規模なガンマ線源による照射が可能のため、工業用をはじめ幅広い場面で照射施設の線源として利用されている。農業分野では、滅菌や殺虫のための食品照射やジャガイモなどの発芽抑制による長期保存などととも放射線による突然変異を利用した品種改良にガンマ線照射が利用されている。

1927年にはショウジョウバエにX線を照射すると突然変異が生じることが発見され、その翌年にはトウモロコシでもX線照射による突然変異が誘発されることが示された。それ以後、X線による突然変異を植物の品種改良に利用する試みが欧米を中心として始められた。

しかし、1950年代になると ^{60}Co や ^{137}Cs などの γ 線を照射する線源が容易に得られるようになって、X線に替わってガンマ線が多く

用いられるようになった。遺伝子の本体であるDNAに放射線が当たり大きな障害を受けると致死となるが、生物細胞にはDNAが受けた障害を修復する機能があり、修復の際のミスが突然変異となる。また、DNAの比較的小さな部分が欠失しても突然変異として発現する。このため、放射線による突然変異の大部分は劣性の遺伝をする。

このような放射線により誘発される突然変異は大部分が役に立たない形質のものであるが、この中から農業上有用な形質の突然変異だけを選抜して品種改良を行うのが放射線育種である。

放射線育種についての基礎研究及び応用研究が1960年代から70年代にかけて盛んに行われ、育種学研究の1分野を成していた。その後、バイオテクノロジーの著しい進展に伴い、研究者の興味はバイオテク研究に向かい、放射線育種の研究の占める割合は少なくなった。

しかし、それ以後も、低蛋白質米などの成分変異による新規特性を持つ突然変異の開発やナシの耐病性突然変異による品種育成などのほか、栄養繁殖性作物の放射線育種ではつねに問題となっていた変異した細胞と母細胞が同じ個体に混在するキメラという問題を組織培養と放射線照射を組み合わせることにより解消する技術が開発されるなど、放射

線育種研究は着実に進められている。また、それまでの研究成果が実を結んで、これまでに多くの作物で突然変異品種が育成されてきた。農作物の品種改良における放射線育種の役割は定着してきたと言えよう。

2. ガンマーフィールド

種子や球根などの休眠している材料とは異なり、生育中の植物に放射線を照射することはその効果が異なることが期待される。1950年代から60年代にかけて欧米では屋外で生育中の植物にガンマ線を照射するガンマーフィールドが設立され、生育中の植物への放射線の影響や突然変異誘発に関する研究が進められた。しかし、これらの施設の多くが核戦争に備えての放射線による植物への影響を調べる目的をも兼ねていたため、冷戦終了とともにそれらの大部分が廃止されている。

一方、我が国では1960年に設立された放射線育種場（現在は農業生物資源研究所放射線育種場、単に放射線育種場と略）にガンマーフィールドが設けられ、1961年から照射が開始されたが、この施設は最初から農業利用だけを目的としているため、現在も照射は続けられており、ガンマーフィールドとしては照射圃場面積、線源の規模ともに世界最大となっている。

ガンマーフィールドは半径100mの円形の圃場で中央に照射塔があり、ここからガンマ線が照射される。周囲は高さ8mの土塁で囲まれ、直射線は外にでないようになっている。平日の毎日正午から8時間（設立から平成元年までは20時間）の照射が行われている。

放射線育種場ではガンマーフィールドのほか熱帯・亜熱帯植物の照射が可能なガンマー

グリーンハウス、種子、球根、さし穂などの照射を行うガンマールームがあり、放射線育種に関する基礎研究を行っている。

ガンマーフィールドは全国で共用する施設として設けられたもので、放射線育種場では国公立の研究機関、大学、民間からの依頼があれば照射を行うこととなっている。ただし、国立機関では有料である。

放射線育種場は毎年秋に一般公開を行い、放射線育種場における施設の見学と研究内容の紹介を行っているが、あらかじめ連絡があれば平日の午前中は見学できる。

3. 放射線育種による成果

放射線照射によるものをはじめ、突然変異を利用して育成された品種は、1996年の統計で世界中で約1700品種となっており、現在は2000近くに達していると推定されている。国別では中国が最も多く305品種で穀類が主体である。次いでインド（237）、旧ソ連（208）、オランダ（178）と続くが、オランダはそのほとんどが観賞植物であり、国によって突然変異育種の対象が異なっている。我が国はドイツ（141）に次いで6番目に位置する。

我が国では、突然変異系統からそのまま品種として育成されたものは118品種（1999年4月現在の種苗登録品種）に及ぶ。作物別ではキクが最も多く20品種、ついでイネが15品種であり、そのほか、コムギ、オオムギなどの穀類から、豆類、工芸作物、野菜、花き・花木、果樹まで広範な38作物で突然変異品種が育成されている。

突然変異品種を育成した機関は民間機関と都道府県の公立研究機関が最も多く、両者を合わせると80%近くに達し、地域の農業に密

表1 我が国の作物別突然変異品種数 (1999.4現在)

作物名	品種数	作物名	品種数	作物名	品種数	作物名	品種数
イネ	16	シチトウイ	1	かすみそう	1	アメリカフヨウ	1
コムギ	2	イグサ	2	みやこわすれ	1	はばたん	1
オオムギ	4	イチゴ	4	アベリア	1	シバ	2
ハトムギ	2	レタス	3	サツキ	1	ベントグラス	2
ダイズ	9	トマト	1	カーネーション	1	アカクロバ	1
アズキ	1	ゴボウ	5	ゆり	1	えのきたけ	1
ソラマメ	1	サトイモ	1	クレマチス	2	リンゴ	1
かんしょ	1	フキ	1	バラ	4	ビワ	1
ばれいしょ	1	シンビジウム	2	キク	22	ナシ	3
ナタネ	1	ベゴニア	6	エニシダ	4	モモ	1
サトウキビ	1	スターチス	1	トロロアオイ	4		

着した農作物の品種改良に放射線育種が利用されていると言えよう。放射線育種場では、研究の過程で得られた突然変異から、また、公立機関あるいは民間との共同研究により8品種を育成している(表1)。

突然変異により育成された品種の変異誘発原はガンマ線が約80%を占めるが、X線も用いられている。放射線育種場では、前述のように依頼照射制度を設けており、ガンマ線照射により育成された品種のうちの約3分の2は放射線育種場で照射されたものである。

1970年代には突然変異誘発効果のある種々の化学物質について突然変異誘発効率、得られる突然変異の種類などを放射線と比較する基礎研究が盛んに行われたが、化学物質による突然変異から品種になったものはそれほど多くはない。また、最近では、薬培養、プロトプラスト培養などを含むバイオテクノロジー技術の活用が盛んになって、公立機関や民間においてこれらの培養過程で得られる変異を利用した品種も育成されている。

突然変異系統から直接品種が育成される場合だけではなく、有用な特性を持つ突然変異系統または突然変異から育成された品種をさらに交配親として用いて品種が育成される場合を間接利用と呼んでいるが、イネでは「レ

イメイ」の強稈性あるいは耐倒伏性を利用したものを含め、間接利用による38品種が育成され、その他の作物を含めると50品種に達している。

4. 突然変異品種の特性

(1) 短稈(または半矮性)及び早生の突然変異

突然変異による品種の誘発された変異形質は、種子繁殖作物では短稈(または半矮性)と早生化が最も多い。我が国の初めての突然変異品種である、1966年に育成された水稻品種「レイメイ」は多収品種「フジミノリ」からの半矮性突然変異で耐倒伏性が強くなったものであり、全盛期(1970年)には作付面積は13万haに達した。また、「レイメイ」の半矮性を交配により取り込んだ「アキヒカリ」など11品種が育成されている。イネ以外でも、コムギ、ビール麦、ハトムギ、ソラマメなどで半矮性または短稈の突然変異から品種が育成されている。

一方、ダイズでは土壤に生息する線虫ネマトダによる被害が大きく、その被害が大きい秋田地方ではとくに線虫抵抗性品種の育成が望まれていた。当時、線虫抵抗性ではあるが極晩生のため栽培には適さなかった「ネマシラズ」の種子にガンマ線照射を行って早生突然変異を選抜し、早生で線虫抵抗性の品種「ライデン」が育成された。これらの地方では、「ライデン」とともに育成された中生品種「ライコウ」の2品種で1974年には秋田県で1,643haが作付された。また、ダイズでは、早生突然変異による品種が多く、合わせて6品種が育成されている。

イネの「レイメイ」、ダイズの「ライデン」及び「ライコウ」は放射線育種場が設立される前に旧農技研で照射されたものであるが、放射線利用による品種改良の先駆けとしてその意義は大きなものがあった。

これらの突然変異品種で改良された特性である半矮性ないしは短稈並びに早生という特性は、比較的突然変異率が高く、肉眼による選抜も容易であることから、種子繁殖性作物ではこの両特性のいずれかを突然変異により改良した品種が数多く育成されている。さらに、早生突然変異は生育期間が短くなるため、必然的に短稈となることが多く、この両特性が同時に改良された品種も数多く育成されている。

(2) 耐病性突然変異

ナシの品種「二十世紀」は黒斑病に弱く、その防除のための労力と経費は多大なものであり、耐病性品種の育成が強く望まれていた。ガンマーフィールドに設立当初から定植され緩照射を受けてきた「二十世紀」の個体の中

に、1981年になって黒斑病の病徴が見られない1枝が発見された。この枝から得られた突然変異系統は黒斑病に耐病性を示し、それ以外の特性は「二十世紀」と変わらないことが確認され、1991年に「ゴールド二十世紀」として登録された。この品種のナシ生産における省農薬・省力化効果は大きく、育成時にはこれが普及したときの経済効果は鳥取県で43億円と試算された。現在は鳥取県を中心に普及に移され、すでにその果実が市販されている。

ナシの黒斑病はリーフディスク（葉を円形に打ち抜いたもの）を菌の培養から抽出される毒素に漬けてその色の変化で耐病性の検定が可能なことが示された。この方法によりガンマーフィールドで照射された「おさ二十世紀」から「おさゴールド」が、ガンマ線急照射を行った「新水」から「寿新水」がそれぞれ耐病性品種として育成・登録された。

また、大麦縞萎縮病は土壌伝染性のウィルス病で防除が困難な病害であり、抵抗性品種の育成が強く望まれていた。放射線育種場ではガンマ線生体照射で得られた早生突然変異系統「Ea52」がこの病害に抵抗性であることを見いだした。この抵抗性遺伝子を持つ「Ea52」を母本として抵抗性品種「マサカドムギ」が育成された。

一般に作物の病害抵抗性は優性遺伝子によることが多い。一方、人為突然変異の遺伝子はほとんどが劣性であり、ナシの黒斑病耐病性及び大麦の縞萎縮病はいずれもその特性は劣性遺伝子によるものであることが明らかにされており、在来の抵抗性遺伝子とその遺伝様式が異なっていることは興味深いことである。病害抵抗性の機作を知る上で貴重な素材



二十世紀(左)と、
ゴールド二十世紀
(右)の幼果における
病徴の差異

を提供するものと言えよう。

一方、病害抵抗性の突然変異ではないが興味ある事例として、トマトのガンマ線により野生種との交雑不和合性を打破した和合性の突然変異を得て、野生種との交配を可能にし、野生種からTMV及び根腐れ病複合抵抗性を導入した「強力玲光」が育成されている。

(3) 品質・成分の突然変異

イネでは、胚乳形質についての種々の突然変異による品種が育成されている。

大粒や心白粒など酒造用に適した品種として、1978年に育成された「美山錦」をはじめとして数品種が、また、もち性突然変異によるもち品種が育成されている。

でん粉にはアミロースとアミロペクチンがあり、もち米はアミロペクチンだけでうるち米は約20%のアミロースを含むが、一般に米飯の食味はアミロース含量が低い方が優れている。最近、アミロース含量が低下した突然変異を利用して、低アミロースの良食味米品種が各地で次々と育成され普及されている。特に、低アミロース品種では冷えてからの米飯の食味が通常のものより優れることからレトルト食品として注目されている。

また、最近の放射線育種場で得られた新しい特性をもつたん白質の変異体が、医療用など機能性食品としての利用が期待されている。米を食べてアレルギーを起こす人が増加しているが、そのアレルギーたん白質がもとの半分以下に減少している突然変異が見いだされた。この突然変異系統「LA-1」は低アレルギー米としての利用が可能なものとして注目されている。

もう一つの突然変異はイネの胚乳に含まれるたん白質のうち、易消化性のグルテリンが

もとの約2/3に減少したものである。たん白質の摂取が厳しく制限されている腎臓病患者の食事療法用の低たん白米として注目され、病院との共同研究により臨床試験が進められている。

また、ダイズでも突然変異により画期的な成果が得られている。大豆製品特有の青臭さ、豆臭さの原因となっているのはリポキシゲナーゼという酵素であり、この酵素に関係する3対の遺伝子をすべて欠けば青臭さは消える。

しかし、詳細は省略するが、これを交配により育成するのは遺伝的に困難であった。そこで、ガンマ線を照射して突然変異によりすべてのリポキシゲナーゼを欠いた品種「いちひめ」が育成された。風味の良い豆腐や豆乳、さらにはクッキーなどの新たなダイズ加工製品の可能性が開かれた。

(4) 花色等の突然変異

放射線を照射して突然変異が生じても、変異した組織と元の組織が同一個体内に混在する状態（キメラ）となる。

種子繁殖作物では受精卵という1細胞を経過するため問題とはならないが、いも類をはじめ接ぎ木や挿し木などで繁殖する栄養繁殖性作物では、有用な変異が起きても増殖できる個体レベルの変異が選抜できない、変異が安定せず元に戻りやすいなどの問題が生じる。そこで、放射線育種場では組織培養技術と放射線照射を組み合わせることにより、増殖可能な安定した変異体を選抜できる技術を開発した。

キクでは沖縄の桃色の切花用品種「大平」をガンマフィールドで照射して花やつぼみの部分を培養することにより、白色の「南風

の初雪」をはじめ花色が種々に変異した6品種が育成された。また、エニシダの幼胚にガンマ線を急照射と培養の組み合わせから樹高が45cm以下の極矮性や種々の程度の矮性、樹形や花色も様々に変わった突然変異系統が得られ、8品種が育成された。

さらに、褐色または黄白色のエノキタケについて培養中の菌糸にガンマ線を急照射し、色を識別するある条件の光を当てて純白色の突然変異が選抜され、「臥竜1号」が育成された。きのこ類の放射線育種は世界でも初めてであり、この手法は特許出願中である。

これらの突然変異品種のほとんどは放射線育種場と公立機関あるいは民間との共同研究によるものであり、現在も他の作物について、それぞれの作物の培養法の確立などの共同研究が行われている。

5. 将来の放射線育種

近年の遺伝子組換技術の進展は著しい。ここで遺伝子組換技術と放射線育種の比較を行っておく必要がある。

遺伝子組換技術はその植物に全く存在しない形質を他の植物から導入する技術である。近縁の植物にも存在しないような遺伝子は突然変異の誘発率も極めて低いと考えられ、遺伝子組換技術の方が優るであろう。しかし、遺伝子組換技術にも目的とする遺伝子の存在を必要とするなどの制限がある。また、突然変異では栽培特性の優れた品種のほとんどの特性はそのままに1つの遺伝子だけを突然変異させて、新規特性を付与した品種や、耐病性突然変異による省農薬などの環境保全が図れる品種が育成できるという特徴がある。最近公立機関や民間で突然変異により育成され

た品種の多くはこの特徴を利用したものである。

また、放射線による突然変異のほとんどは劣性の遺伝をするのに対し、遺伝子組換では外来の遺伝子を付加するものであり、優性の遺伝をする。そのため、両者が対象とする形質は異なると考えられる。さらに、遺伝子組換体はとくに食用作物では安全性の評価が必須であるが、放射線育種では自然でも起こる突然変異を人為的に誘発させるだけであり、安全性は問題ではなく、また多くの品種の普及実績がある。結局、放射線育種と遺伝子組換技術は目的によって使い分けられるべき技術である。

農林水産省の試験研究機関は平成13年4月から独立行政法人化されることとなり、そのための組織再編が進められているが、その中で放射線育種場の組織は残ることが検討されており、毎年400～700件の申し込みがある依頼照射は、今後も続けられるであろうし、新規特性の付与による地域農業の活性化など時代の要請に依っていく必要がある。

最近、農産物に対する需要が多様化し、他の地域にはない品質特性を持つ、いわゆる差別化された農産物の必要性から、品質・成分の変異などが求められており、交配育種などとともに放射線育種もその特徴を生かしてこれらの需要に応じて行く必要がある。

一方、放射線育種場における組織培養と組み合わせた最近の放射線育種研究の成果は、東南アジアを中心とした海外からも注目されており、今後、国際的協力の必要性が増加することが予想される。