

## モチ・サツマイモの育成

石川県農業短期大学農業資源研究所

教 授 島 田 多 喜 子

助 教 授 大 谷 基 泰

### 1. 澱粉のモチ性

イネにはモチ米とウルチ米があり、その利用は昔から日本人の生活に密接に結びついている。坂本寧男著「モチの文化誌」(1989)によれば、「モチ性はイネ科の栽培種(イネ, アワ, キビ, ハトムギ, モロコシ, オオムギ, トウモロコシ)のみに知られており, 祖先野生種やその近縁種, あるいはそれ以外の野生種には全く知られていないのである。また, 面白いことに, ユリの鱗茎(百合根), ジャガイモの塊茎, サツマイモの塊根など, 大量の澱粉が貯蔵されており, われわれが日常利用している顕著な栄養繁殖体にはすべてウルチ性澱粉が貯蔵されており, モチ性のものが貯蔵されているという例は, 今までにまったく報告されていない。」とある。また, モチ性穀類を利用する文化は東アジアに特異的に成立したということで, 食文化的にも非常に興味深い。

澱粉はグルコースが直鎖状につながったアミロースと枝分かれしているアミロペクチンから構成されており, その構成比は植物種によって違うが, だいたいアミロースが20-25%である。ところがモチ性の澱粉には殆どアミロースが含まれていない。モチ米はアミロペクチンが100%で, アミロースが全く含まれていない。ダンゴムギなどとよばれているモチ大麦には, 数%のアミロースが含まれているにすぎない。トウモロコシではワキシーコーンとよばれるアミロースが全く含まれない系統から60%以上もアミロースが含まれる系統まで種々の系統があり, それぞれの用途に合わせて利用されている。

近年, 自然界にはモチ性が存在しない作物において人為的にモチ性の澱粉を持つ品種が育成されている。小麦では, モチ性の遺伝子を潜在的に持っている系統を探し出し, それらをかけ合わせるこ

とによってモチ小麦が開発されている。このモチ小麦は粘りがあつてうどんに適しているという。ジャガイモでは, 放射線を照射して突然変異をおこして, モチ性ジャガイモが育成されている。分子生物学の発展により, 粒結合型澱粉合成酵素(GBSS)とよばれる酵素がアミロースを合成する反応を触媒していることが解明された。モチ性澱粉品種ではこのGBSS酵素が作られないため, アミロースが合成されず, アミロペクチンのみの澱粉となることが分かってきた。そこで, GBSS遺伝子を働かなくするような遺伝子をジャガイモに導入してモチ性澱粉を持つ遺伝子組換えジャガイモが作られている。

サツマイモ澱粉は約20%のアミロースを含み, モチ性のサツマイモは今までなかった。我々は, バイオテクノロジーを使ってサツマイモの品種改良に取り組んできているが, 2年程前, 九州沖縄農業研究センターとの共同研究で, サツマイモのGBSS遺伝子をサツマイモに導入した結果, アミロースを全く含まないモチ性澱粉を持つサツマイモを1個体得ることができた。今回, もっと多くのモチサツマイモを得るために, 遺伝子組換えによってRNA干渉(RNAi)という新しい方法で多くのモチサツマイモの作出に成功した。

### 2. サツマイモの遺伝子導入

植物に特定の遺伝子を導入する方法はいくつかある。アグロバクテリウムという土壌細菌を使って遺伝子を植物細胞に導入する方法がもっともよく使われている。遺伝子組換え植物を得るには, 特定の遺伝子が導入された細胞から再び植物個体を育てていく過程が必要であり, それは組織培養技術である。組織培養技術を使わないで遺伝子組換え体を作る方法もあるが, 現在ではまだ少数の植物で成功しているにすぎない。

サツマイモの組織培養技術、つまり細胞から植物体への再生技術は、イネやジャガイモなどに比べて難しかった。サツマイモのイモや葉柄などからカルス（細胞塊）を誘導することは容易であり、そのカルスを増殖することができる。しかし、それから芽を再生させ、植物にまで育てるのは限られた品種で成功しているにすぎず、またその頻度は低かった。我々は、サツマイモの蔓先の生長点を特殊な植物ホルモンで培養することによって、植物体を再生する能力を持ったカルスを得ることに成功した。その再生能力のあるカルスに、導入したい遺伝子を付与したアグロバクテリウムを接種し、サツマイモ細胞に遺伝子を組み込んだ。その細胞から遺伝子組換えサツマイモを得ることに数年前に成功した。現在まで、除草剤耐性遺伝子など種々の遺伝子を導入した組換えサツマイモの解析を進めている。

### 3. モチサツマイモの育成

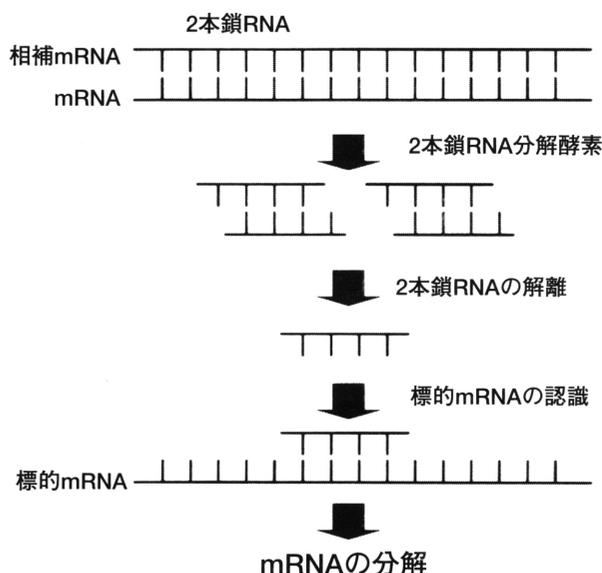
前述したように、モチ性の澱粉にはアミロースが含まれていない。そこでアミロース合成に関与するGBSS遺伝子を操作することによってモチ性澱粉にすることが可能である。九州沖縄農業研究センターの木村ら（1998）はイネやジャガイモなどの遺伝子と相同性の高いサツマイモのGBSS遺伝子を単離して解析した。我々は、その遺伝子情報から、RNA干渉を生じるようにGBSS遺伝子の一部を繋いでサツマイモに導入し、遺伝子組換えサツマイモを作成した。

RNA干渉（RNAi）というのは二本鎖RNA（dsRNA）を細胞内に導入すると、その配列に対応するmRNAが特異的に分解されることにより遺伝子発現が抑制される現象で、1998年に線虫で発見され、その後種々の生物で同じ現象が報告されてきている（図1）。ここでは、サツマイモGBSS遺伝子の一部を二本鎖RNAを作るように設計して、それをサツマイモに導入した。その結果生じたGBSSの二本鎖RNAがサツマイモのGBSS mRNAを分解してしまうためにGBSS酵素を作ることができず、従ってアミロースが作られない、つまりモチ性の澱粉のサツマイモになることが期待された。

サツマイモの品種「高系14号」の再分化能力の

図1. RNA干渉の模式図

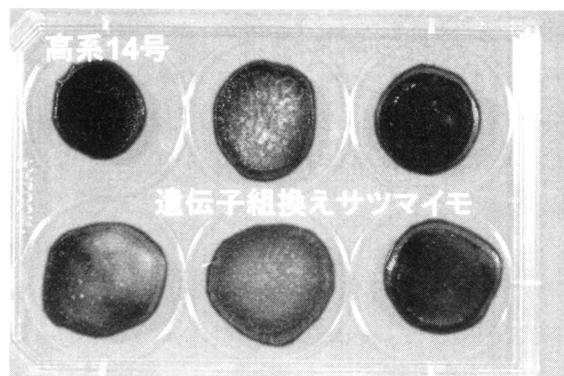
(杉浦 生物と科学40より改変)



高いカルスにアグロバクテリウムを利用して上述したように設計された遺伝子を導入した。多くの遺伝子組換えサツマイモが得られたが、そのうち38系統を隔離温室で栽培し分析した。イモの切片をヨウ素染色したところ、70%以上の組換え系統の澱粉が赤茶色に染まった（図2）。ヨウ素はアミロースに結合して濃青色になるため、普通のサツマイモは濃青色に染まる。ところが濃青色ではなくて赤茶色であるということは、アミロースがないか、非常に低いことを示している。実際に、分光光度計で測定し、アミロース含量を計算したところ、赤茶色に染色された澱粉にはアミロースが全く含まれていないことが確認された。

図2. 形質転換サツマイモのヨウ素染色。

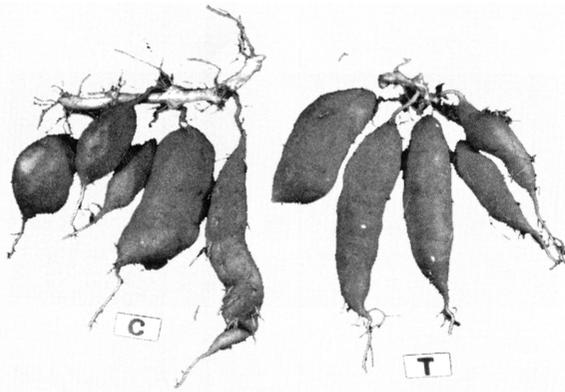
5系統中、1系統（上段右）が高系14号（左上）と同じ濃青色に染色、その他は赤茶色に染色され、アミロースが含まれないことを示した。



遺伝子組換え植物のうち約30%は濃青色に染まり、分析の結果、普通のサツマイモと同じ18-20%のアミロース含量であり、中間の含量のものはなかった。RNA干渉が70%以上の組換え体で働いて、GBSS遺伝子の発現を完全に阻止したと考えられる。RNA干渉が遺伝子の発現を阻止し、新たな形質を付与するのに非常に有効な手段であるといえる。

遺伝子組換えサツマイモは、高系14号と見かけは殆ど差異がなく、正常に生育した(図3)イモの収量も正常のものと同様で変らなかった。また、澱粉収量も大きな差異はなく、アミロースを全く含まないモチ性の系統とアミロースを含む系統も大きな差異はなかった。

図3. 高系14号(左)と遺伝子組換えサツマイモ(右)。形態、収量とも殆ど差異がない。



#### 4. これからのサツマイモ

サツマイモは単位面積当たり澱粉生産量が最も高い作物である。しかも、窒素肥料の要求性が低く、少量の肥料で最大の収穫を上げることができる。また、他の作物に比べて病害虫、雑草、自然災害が少ないため、農薬の使用量も少なく済む。そのため、サツマイモは環境に負荷を与えることが少ない、まさに21世紀の日本の作物といえる。

澱粉は食品加工や工業用原料として幅広く大量に利用されており、このようなサツマイモの澱粉が大いに利用されることが望ましいが、残念ながら、現在では、食品加工や工業用原料には殆どがトウモロコシ澱粉が使われているという。トウモロコシでは種々の突然変異体があり、その澱粉はアミロース含量が0%のワキシコーンと言われ

るものから60%以上もあるアミロコーンまで種々の澱粉がそろっている。そのため用途に応じた成分の澱粉が生産できれば、利用が拡大できる可能性が高くなる。我々は、遺伝子組換えによってワキシコーンに匹敵できるワキシースイートポテト(モチサツマイモ)の育成に成功した。これは、新しい食品素材としての利用、増粘剤、澱粉フィルムなど種々な利用が期待される。また、アミロース含量を増加したサツマイモの育成にも取り組み始めた。

サツマイモ生産の拡大のためには、澱粉組成の改変以外に生産コスト削減が必要である。澱粉含量を増加させることも生産コスト削減につながるだろう。従来の育種方法で澱粉含量が多い澱粉生産用のサツマイモ品種が開発されてきているが、さらなる澱粉生産の増大のためには遺伝子組換え技術が必要となるだろう。また、トウモロコシ生産は高度に機械化され省力化によって生産コストが抑えられている。ところが、サツマイモは苗の植え付け、収穫などでの機械化が進んでいない。機械の開発と共に、機械化に適した直播用の高澱粉生産性品種の開発も必要である。

さらに、サツマイモ澱粉の改変については、アミロース含量の変更のみならず全く新しい付加価値の高い澱粉(炭水化物)を微生物由来の様々な糖質関連酵素遺伝子の組換えによって、サツマイモで生産できる可能性もある。現在のところは、遺伝子組換え作物が容易に受け入れられる状況ではないが、これからの研究の進展により安全性が確信できるようになっていくと我々は楽観している。すばらしい作物であるサツマイモを遺伝子組換えによって種々の新規な澱粉を生産できるようにし、近い将来、食品加工や工業原料として大いに利用されることを夢見ている。

#### 用語説明

粒結合型デンプン合成酵素

(granule-bound starch synthase, GBSS)

デンプンの生合成に関与する酵素の一種で、澱粉に強固に結合(granule-bound)している。この酵素が欠損したwaxy変異体では澱粉がアミロスフリー(モチ)になることから、GBSSはアミロース合成を行うとされている。

### アンチセンスRNA

遺伝子(DNA)を鋳型にして合成されるリボ核酸(メッセンジャーRNA、mRNA)に対し相補的な配列を持つRNA。アンチセンスRNAが細胞内にあると、相補的なmRNAと対合し、遺伝子の発現を抑制する。この技術によって遺伝子発現を任意に抑制できる。

### RNA干渉

二本鎖RNAを細胞内に導入すると、その配列に対応するmRNAが特異的に分解されることにより

遺伝子発現が抑制される現象をいう。図1に示されるように、細胞内の二本鎖RNAは短い二本鎖RNAに分解される。その短い二本鎖RNAが1本になり、その配列に対応するmRNAに対合するとそのmRNAは分解されてしまう。そのため遺伝子発現が抑制されてしまう。この機構を利用して細胞内で合成される種々のタンパク質の量を減少させ、望ましい形質になるような遺伝子組換えが行われている。

## 肥料と切手よもやま話 (12)

越 野 正 義



### 精密農業と肥料

このシリーズの最後に宇宙開発と人間生活の切手(国連)をご覧ください。空には人工衛星が飛びパラボラアンテナがあり、手前にはコンバインで何かを収穫している。

人工衛星の農業利用では、冷戦時代のアメリカがソ連の農作物収量を推測していた例が有名である。日本でも作付け面積、収量、品質、病害虫被害の発生などをリアルタイムに推定する研究がされている。解像度が高くなると、いつこの畑にトラクターが入ったかまで分かるようである。

現在では位置情報の利用が重要である。カーナビを収穫機に付けて走行中に収量データを取り、位置情報とともに記録する技術はアメリカでは実用化されている。北陸農業研究センターでも水田で研究しており、収量のマップを細かく作り、翌年の施肥管理に利用しようとしている。衛星データではなく、土壌分析を走行中の作業機でリアルタイムに連続的に行なうことも試みられている。

土壌中の肥料成分のマップができれば、それに応じて施肥量が変わる施肥機(variable-rate applicator)が必要になる。走行中に、三要素の比率を変えながら施肥量を自由に変えられる肥料の形態はどういうものか、今から研究する必要がないだろうか。

(財 日本肥糧検定協会 参与)