

2007年12月4日  
独立行政法人 理化学研究所

## DNAの量によって植物の大きさが決まる新たな仕組みを解明

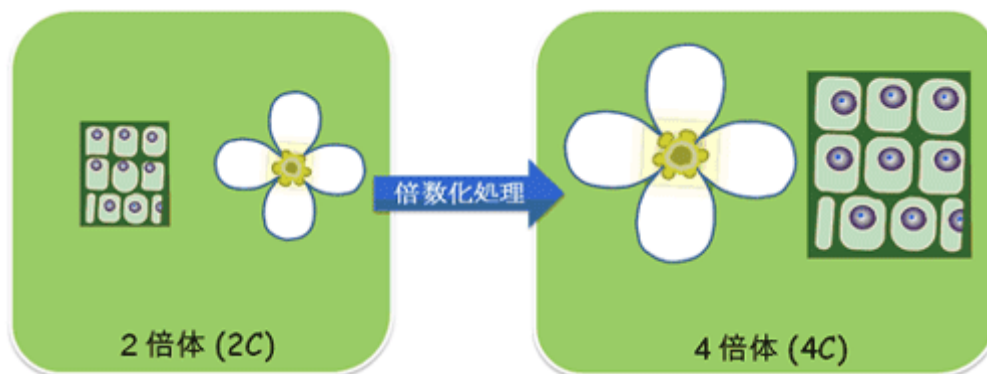
- 植物の核内倍加は染色体のセット数を変えずにDNA量を増やすメカニズムが働く -

生命の設計図であるDNAが、細胞の中で増えたらどうなるのでしょうか？ その答えは、増えたDNAの量を反映して細胞が大きくなり、大きくなった細胞で構成されている動・植物は、当然のように大きくなります。実際に、この現象を利用して、薬剤処理によって染色体のセット数を人工的に増やすことで、ジャガイモ、バナナや切り花などの品種改良が行われています。

しかし、なぜDNA量が2倍、3倍と増えると細胞や動・植物そのものが大きくなるのか、その仕組みは謎でした。

理研植物科学研究センターの細胞機能研究ユニットは、作物の品種改良などに利用している薬剤処理による染色体のセット数を人為的に増やす手法と違って、自然現象で発生する「核内倍加」メカニズムは、染色体のセット数は増えないまま、既存の染色体の束が太くなるようにDNA量を増やしていることを発見しました。この核内倍加には、DNAの二重らせんがもつれないように解く「DNAトポイソメラーゼVI」と呼ぶ特殊な酵素複合体が必須であることも解明しました。さらに、細胞の核に含まれるDNAの量に比例して、細胞のサイズが大きくなり、植物体も大きくなっていることを、実際に計測して、確認しました。

これらの結果は、モデル植物であるシロイヌナズナを使って確かめたものですが、核内倍加が作物を大きくする有力な手法となることを初めて明らかにしたもので、大きな期待が持てます。また、この核内倍加の手法を用いて、人為的な薬剤処理では不可能だった、果物の実や園芸用の花だけを大きくするなど、個別のターゲットを狙うことができるようになるかもしれません。



(図)DNAの倍数化。核内のDNA量が増加し細胞が大きくなり、植物も大きくなる

2007年12月4日  
独立行政法人 理化学研究所

## DNAの量によって植物の大きさが決まる新たな仕組みを解明

- 植物の核内倍加は染色体のセット数を変えずにDNA量を増やすメカニズムが働く -

### ◇ポイント◇

- ・自然界のDNA量の増加現象と人為的倍数化は仕組みが異なる
- ・自発的なDNA量増加にはDNAのらせんをほどく酵素DNAトポイソメラーゼVIが必要
- ・作物の収量を向上する技術開発に貢献

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）は、細胞に含まれるDNA量を増加させて植物が大きくなる核内倍加と呼ばれる現象が、すでに知られていた染色体のセット数を増やす仕組みと異なり、染色体のセット数を一定にしたままDNA量を増やす仕組みによって起きることを明らかにしました。これは理研植物科学研究センター（篠崎一雄センター長）機能開発研究グループ細胞機能研究ユニットの杉本慶子ユニットリーダーと英国ジョンイネス研究所（クリス・ラム所長）、国立大学法人東京大学（小宮山宏総長）、神奈川大学（中島三千男学長）などとの共同研究の成果です。

作物の品種改良には、コルヒチンなどの薬剤処理を施して染色体のセット数を人為的に増やし、3倍体、4倍体といった多倍体<sup>\*1</sup>を作成する方法がしばしば用いられます。それによって、植物体の大型化や品質の向上が見込めることが大きな理由となっています。しかし、染色体が増えると作物が大きくなる理由はわかっていません。一方、自然界でも植物が自発的に核内のDNA量を増加させる現象、すなわち核内倍加<sup>\*2</sup>現象と呼ばれる仕組みが存在することが知られています。核内倍加を行っている細胞では、細胞の分裂を伴わずにDNAの複製だけが繰り返され、結果として細胞の中のDNA量が増加しますが、この詳しい仕組みについても、これまでよくわかっていませんでした。

研究チームは、モデル植物として広く活用されているシロイナズナの核内倍加には、既存の染色体上での複製を繰り返し、染色体の束が太くなるようにDNA量を増やすメカニズムが働いていることを、世界で初めて明らかにしました。さらに、こうした核内倍加の過程には、DNAのらせんをほどくDNAトポイソメラーゼVI<sup>\*3</sup>と呼ばれる特殊な酵素複合体が必要であることがわかりました。この酵素複合体の働きは、核内倍加を行う際、DNAが増えるたびに生じる“もつれ”を解消するために必要であると推定されます。さらに、人為的、自発的に起きるDNA量の増加と比例して細胞サイズが大きくなり、ひいては植物体も大きくなることを計測し、明らかにしました。

今回の発見により、DNA量の増加によって植物が大きくなる新たな仕組みの一端が明らかになりました。この研究成果は、今後効率的に作物の収量を向上させる技術の開発に役立つと期待されます。本研究成果は、米国の科学雑誌『*The Plant Cell*』（11月号）に掲載されます。

## 1. 背景

細胞のDNA量が、植物の大きさをどのようにして決定しているのかを理解することは、基礎研究上重要であるだけでなく、作物の収量を上げるための応用研究につながる大切な鍵となります。細胞の中にある核内のDNA量が増加すると、見た目には植物のサイズが大きくなる事実はよく知られており（図1）、こうした知識は人為的に倍数体を作成して作物の品種改良、品質向上を目指すなど、育種に広く利用されています。また、イワナやマスなどの魚類でも、品質向上のため一般的に用いられている技術です。しかし、自然界の植物に一般的に起きている、核内倍加と呼ばれるDNA量の増加現象がどのような仕組みで起きるのかは、これまでよくわかっていませんでした。研究グループは、モデル植物として広く活用されており、自然界でも頻りに核内倍加を引き起こすシロイヌナズナに注目し、核内倍加に異常を起こす突然変異体と、コルヒチン処理<sup>\*4</sup>によって作製したそれらの4倍体の系を使い、メカニズムの解明に挑みました。

## 2. 研究手法と成果

### (1) 蛍光色素を使ったシロイヌナズナの倍数化過程の可視化

研究グループは、蛍光色素を用いてDNAを可視化する、蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション (FISH) と呼ばれる実験方法を用いて、人為的な染色体の倍数化によって生じる染色体構造と、自然界で植物が自発的に行う核内倍加によって生じる染色体構造を比較しました。その結果、前者では、倍加した染色体が核内でそれぞればらばらに存在しているのに対し、後者では倍加した染色体がくっついたままで、束が太くなっていることが明らかになりました。このことから、人為的な染色体の倍数化が染色体のセット数を増やすことによって起きるのに対し、自然界で起きる核内倍加が、染色体のセット数を増やすのではなく、既存の染色体上での複製を繰り返すことによって起きていることがわかりました（図2）。

### (2) シロイヌナズナの突然変異体の解析

野生型のシロイヌナズナでは、通常の細胞分裂を終えると、さまざまな組織を構成する細胞の多くが引き続き核内倍加を行い、DNA量を増やします。研究グループは、核内倍加が進行しなくなる突然変異体を単離し、その個体サイズが正常なもの約十分の一と極小になってしまうこと、またその原因となる突然変異が、DNAトポイソメラーゼVI複合体の新しい構成因子で、研究グループがBIN4と命名したタンパク質に起きていることを突き止めました。BIN4の機能を失うと、細胞内の酵素であるDNAトポイソメラーゼVIが働かなくなります。その結果、DNAトポイソメラーゼVIの働きの1つである、核内倍加の際に生じる異常現象を解消する機能を発揮することができなくなり、DNAの2重らせんがもつれたままになると考えられます。

### (3) シロイヌナズナの4倍体の作製

研究グループは、次に、染色体を倍数化させる手法として通常使われている、発芽直後の芽生えのコルヒチン処理により、BIN4の突然変異株の4倍体を作

製しました。これは、BIN4の変異体が極小となる理由を確かめるため、具体的には、BIN4の変異体の核内倍加異常によるDNA量の不足が極小化の原因となっているかを確認しました。その結果、BIN4変異体の2倍体では、大きさが正常なものの約十分の一であったのに対し、4倍体では、コルヒチンによる倍数化処理によって、その細胞の大きさが回復し、個体全体も2倍体の倍程度の大きさにまで生長しました。これは、BIN4の変異体では、BIN4の機能を失い、束を太くするメカニズムは働かないままですが、コルヒチン処理のため、セット数を増やすメカニズムが働いて、染色体が倍数化したために植物が大きくなったと考えられます。このことから、人為的な染色体の倍数化と自然界の核内倍加という2つの異なったDNA倍加現象が、細胞の生長に対しては同様の効果を持つことが明らかになりました(図3)。また、核内のDNA量の2倍増に伴って細胞の大きさが2倍になり、ひいては植物体全体の大きさも倍増するということが初めて直接的に示されました。

### 3. 今後の期待

今回の研究成果から、植物のDNA量の増加現象には、染色体のセットが増える倍数化の方法と、セット数が一定のまま染色体上で複製を繰り返す核内倍加の方法といった複数の方法があることが明らかになりました。また、その方法によらず、核に含まれるDNA量が2倍になると細胞の大きさが2倍になるというように、DNA量の増加量と比例して、植物の細胞、器官の大きさが大きくなることがわかりました。今後、核内倍加を制御する仕組みがさらに明らかになれば、核内倍加を通してDNAの量を増加させ、作物の収量を上げることが可能になると考えられます。また、これまでの育種ではコルヒチン処理によって植物体全体を倍数化する方法が主に用いられてきましたが、今後は、農業作物や花卉(かき)植物の花や葉、茎、根などの有用器官で個別に倍数化、核内倍加を誘導することが可能になると期待されます。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

植物科学研究センター 細胞機能研究ユニット

ユニットリーダー 杉本 慶子(すぎもと けいこ)

Tel : 045-503-9575 / Fax : 045-503-9591

横浜研究推進部 企画課

Tel : 045-503-9117 / Fax : 048-503-9113

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

## <補足説明>

### ※1 多倍体

生物が染色体のセット数を何セット持つかを「倍数性」といい、この倍数性にもとづいた個体を「倍数体」と表す。例えば、動植物などの真核生物の多くは、生存に必要な最低限の染色体セット（1C）を2つ持つ2倍体（2C）であるが、染色体セットを2つ以上持つ生物体のことを多倍体と呼ぶ。特に植物には3倍体（3C）、4倍体（4C）、6倍体（6C）などの様々な倍数体が存在し、身近な例としては栽培品種として市場に出回っている3倍体のバナナや4倍体のジャガイモなどが挙げられる。切り花にする草花も、多くが4倍体とされてきた。倍数体は植物全体が大きくなったり、環境に対する適応性が向上したりする傾向があるため、作物の品種改良の際にコルヒチンなどの薬剤を使って人工的に倍数化を引き起こす手段が古くから用いられてきた。

### ※2 核内倍加

通常細胞分裂を行う細胞ではDNAの複製後に必ず細胞が分裂するため、分裂後の細胞はもとと同じ染色体セットを持つ。しかし、核内倍加を行う細胞では細胞の分裂を経ないでDNAの複製のみが進行するため、1つの細胞中の核内DNA量が増加する。核内倍加は真核生物に広く見られるが、特に植物では頻繁に起き、分化した植物細胞の70%以上が核内倍加を起こす。シロイナズナの葉や茎、根では核内倍加によって4倍性（4C）、8倍性（8C）、16倍性（16C）、32倍性（32C）のDNA量を持つ細胞が生じ、それぞれの器官が成長する原動力となっている。高校の教科書で有名なショウジョウバエやユスリカの唾液腺染色体も、核内倍加によってできあがった巨大な染色体である。

### ※3 DNAトポイソメラーゼVI

DNAの2重らせんのもつれやねじれを解消する酵素。DNAトポイソメラーゼは、一般に生物の生存に必須なDNAの転写、複製、修復時にDNAの2重らせんをほどこき、その立体構造を調節するが、DNAトポイソメラーゼVIは特に植物の核内倍加の際のDNA複製に必要とされる。

### ※4 コルヒチン処理

コルヒチンは、体細胞分裂の際に2つの娘細胞に染色体を分配するのに必要な（紡錘糸からなる）紡錘体の形成を阻害する。一方で染色体分裂は阻害しないのでコルヒチン処理により染色体のセット数が倍加した倍数性の細胞ができる。通常は発芽直後の芽生えをコルヒチン処理し、2倍性、4倍性、8倍性細胞が混在したキメラの植物体を作製した後、次世代の植物体から4倍体（4C）、8倍体（8C）などの倍数体を選抜する。

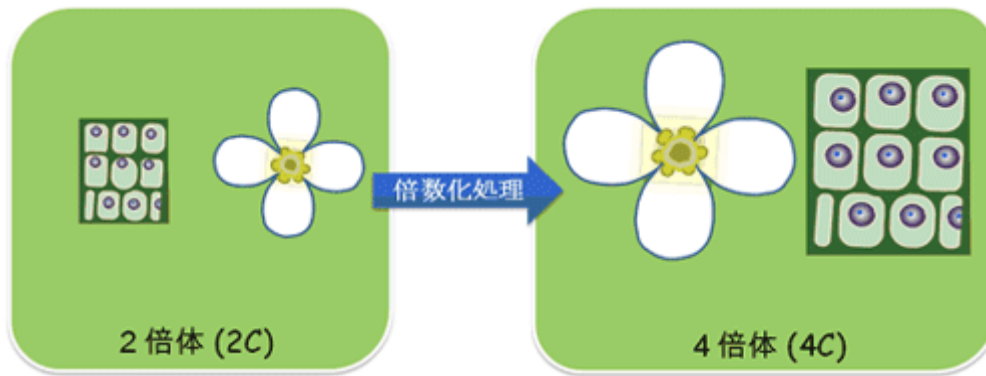


図1 コルヒチン処理による倍數化で、核内の DNA 量が増加すると細胞が大きくなり、植物も大きくなる

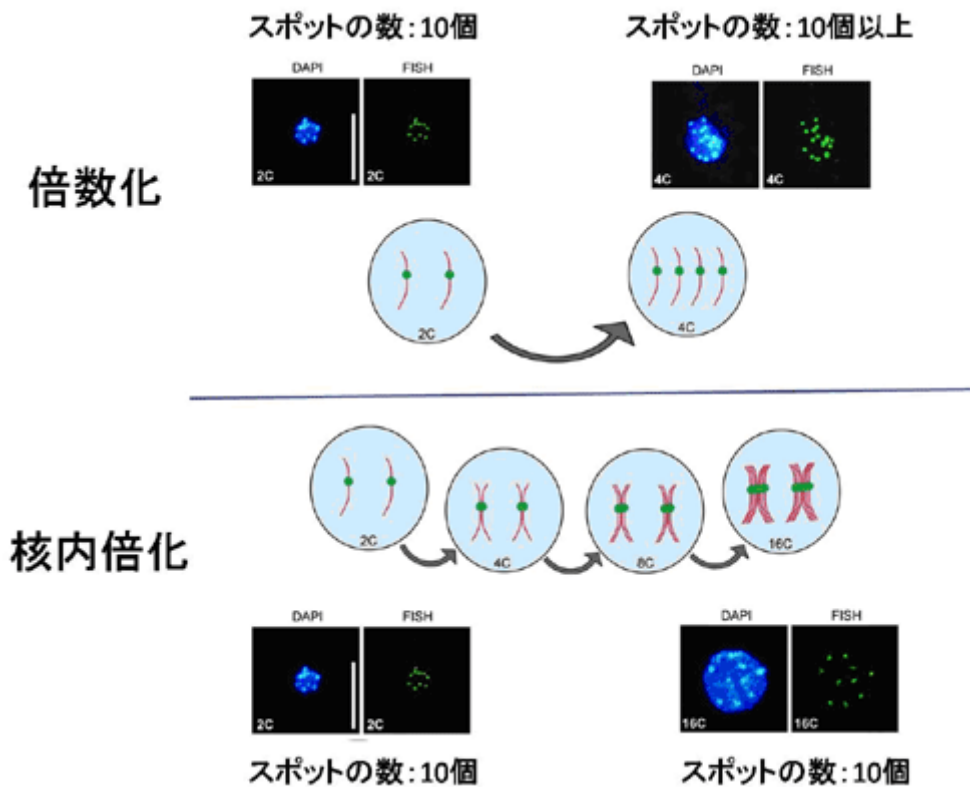


図2 FISH法を用いて可視化された、倍數化によって生じる染色体構造と核内倍加によって生じる染色体構造の比較

セントロメアと呼ばれる染色体の部位を標識するスポットの数が、1つの核の中の染色体の数を表す。2倍体(2C)のシロイナズナには10本の染色体が存在するが、コルヒチン処理によって生じた4倍体(4C)ではその数がおよそ倍に増える。(染色体の数が倍に増えてもセントロメアは一部融合することがあるのでスポット数は必ずしも20個にはならない。)これに対し、核内倍加によって複製された染色体は束になったままであるため、染色体の数は10本のままである。



図3 コルヒチン処理で作製したBIN4の突然変異体の4倍体

BIN4の突然変異体では、DNAトポイソメラーゼが働かないため核内倍加が進行せず、その2倍体の大きさは野生型に比べて十分の一以下に極小化する。コルヒチン処理によって作製したBIN4の突然変異体の4倍体では、核内のDNA量が倍増するため、細胞の大きさ、植物体の大きさが2倍体のおよそ倍にまで回復する。このことから、人為的な染色体の倍数化と自然界の核内倍加という2つの異なったDNA増加現象が、植物の細胞生長に対しては同様の効果を持つことがわかる。また、DNA量の増加が細胞サイズの増加を引き起こし、植物体サイズの増加につながることを世界で初めて実験的に証明した。