

I.

スペースシャトルに搭載された NAOKO アサガオの 形質発現の違いによる変異体検索に原理上向いていない理由

1. 明後日朝顔(あさってアサガオ)の来歴



アーティストの日比野克彦氏は、アサガオの種を通じて人や地域の交流を深める「明後日(あさって)朝顔プロジェクト」を主宰し、平成15年から活動を続けてきた。

2009年7月、鹿児島県などで観測された皆既日食を契機に「宇宙にアサガオを持っていければ」と提案。国産ロケットの発射場がある宇宙航空研究開発機構(JAXA)種子島宇宙センターの関係者を通じ、山崎直子宇宙飛行士に依頼した。

山崎さんは快諾し、「『明後日朝顔』に携わってこられたすべての方々の思いが、この種には詰まっていると思います」と日比野さんにメールで連絡。2010年4月5日、200粒の種とともに飛び立った。

日比野氏は「ちょうどアサガオの種をまく季節。帰還した種をきっかけに私たちの日常が宇宙まで広がり、見えないものをイメージする力になれば」と話した。

2. 明後日朝顔と純系アサガオ“ムラサキ”研究用系統(品種)の遺伝学的特徴

純系(pure-bred strain)と定義されるアサガオ“ムラサキ”研究用系統は、遺伝学的特性を安定させるべく、多くの専門家関係者の長い時間を掛けた努力、労力を掛けて作出されたものである。

その遺伝子レベルにおける特徴は、例えば1つの遺伝子をM(優性)と表記すれば、その相同遺伝子にも優性、同一なM遺伝子が含まれている(図1)。即ちこうした劣性遺伝子をいずれの遺伝子にも欠く構成は普通の自然界には存在するものではなく、正に研究用に人為的に意図を持って作成された結果として存在している。

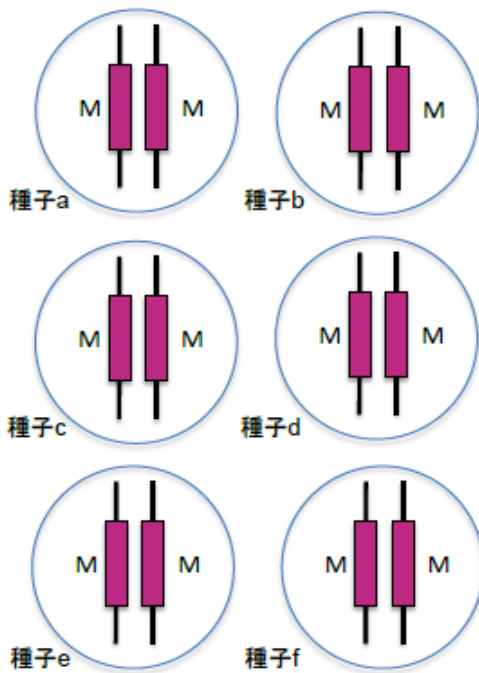


図1: 純系(pure-bred strain)と定義されるアサガオ“ムラサキ”研究用系統(品種)の遺伝学的特性

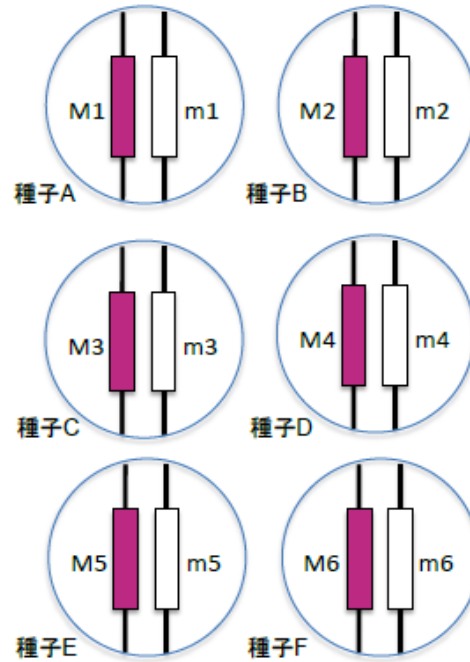


図2: アーティストの日比野克彦氏が明後日朝顔(あさってあさがお)と命名したアサガオ集団の遺伝学的特性

一方、明後日朝顔の個々の個体において、そのプロジェクトのそもそもの性格上、色々な種類のアサガオの複雑に含まれることが容易に想像される(図2)。即ち、M(優性)という1つの遺伝子においても、それぞれ微妙に異なるM1、M2、M3・・・といった遺伝子を持つものの集合体化しているとみられ、さらにそれらの相同遺伝子においても専ら優性遺伝子が含まれることとなる背景がなく、多くはその劣性遺伝子となるm1、m2、m3と識別表記される様々な遺伝子の構成となっていることが推定される。言うまでもなくM以外の他の多くの遺伝子、L、N・・・等においても上記の状況は同様となっていると推定される。即ちどの1粒同士をとっても全く同じものはないと考えるのが妥当であろう。

3. JAXA 第1回宇宙種子実験の実験スキーム

純系アサガオである“ムラサキ”を用いることにより、種子に放射線等の変異原が作用し、その相同遺伝子の内いずれか1つに変異が起きた場合、それはこれまでの実験結果からほぼすべてが劣性遺伝子となることが知られ、また変異を受けずに残ったもう一方の遺伝子もまたそもそも優性遺伝子(wild type)であったため、M1代においてその変異を受

けた側の遺伝情報はタンパク質構造への読み出しには使われず、結果 M2 代ではその変異は表現形質にはならない。

即ち、形や色の違いと言った表現形質のレベルにその変異を受けた遺伝子情報が顕わとされるには自家受粉の後の M2 代以降に待たなければならない(図 3)。

この原理から、JAXA では自家受粉をさせて 2 代以降までの栽培を参加校へお願いしたものである。

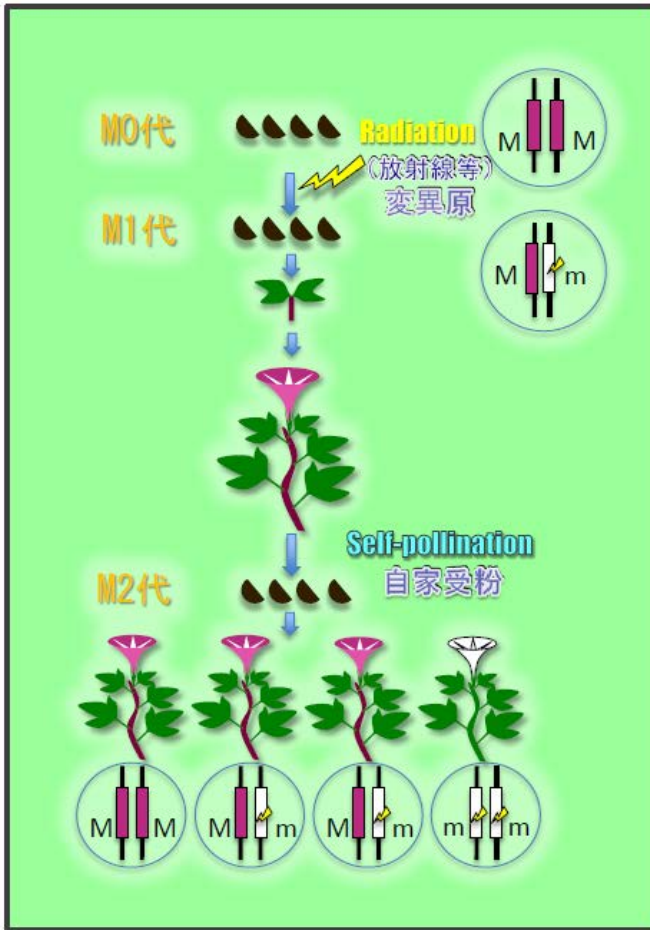


図 3: JAXA 第 1 回宇宙種子実験の実験原理

図 3 から明らかなように、こうした試料でかつ上記の実験方法を用いれば、実際変異が起きていた場合 M2 以降に劣性ホモザイゴートの個体の出現が望まれることとなる(図では変異体が茎と花の赤い色素が欠損した場合として表記されている)

一方、明後日朝顔を試料とした場合、既に始めから個々の種子が様々な遺伝情報を持っているため、それを自家受粉してもあるいは他家受粉させても M1 でも M2 でもさらにそれ以降でも様々な特徴を持ったアサガオ個体があたかもモザイクのように育っていくこと

となり、特定の遺伝子に変異が入ったか否かと言う検索に関し、こうした明後日朝顔の基本的な前提条件の前では表現形質の違いから知らべるといった上記の実験手法を原理上用いることはできない。

II.

2 週間ほどスペースシャトルに搭載された NAOKO アサガオ種子においても宇宙放射線による変異が起こることの可能性は極端に低いと考えられる理由

1. 植物と動物の放射線抵抗性に関する比較

植物と動物を比べると、一般的に植物の方が放射線に対して抵抗性が高い(同じ大きさの放射線を浴びても障害をより受けにくい)ことが知られている。

2. 植物体における種子の放射線に対する抵抗性

植物においては、一般的に種子は他の色々な部位と比べ放射線に対して抵抗性の格段に高いことが知られている。

3. 宇宙フライト種子の推定される放射線被曝量

国際宇宙ステーション(ISS)の船内においては、これまでの多くの計測から1日当たり0.5mSv(ミリシーベルト)程度となることが明らかとなっている。

JAXA 第1回宇宙種子実験(<http://edu.jaxa.jp/seeds/>)において、宇宙フライト種子は約9カ月間、ISSの船内に保管されていたことから、総被曝量は概算で全ミッション期間に渡って135mSv(ミリシーベルト)位となることが推定される。

4. 地上照射群種子の放射線被曝量

本教育プログラムにおいて、地上保管しておいたそれぞれのアサガオ、ミヤコグサ種子の1部はポジティブ・コントロール作成のため、地上において適切量重粒子線を照射した。具体的にはアサガオ、ミヤコグサはそれぞれ理化学研究所サイクロトロンにより、それぞれ50Gy(グレイ)、20Gy(グレイ)の重粒子線を急照射されたものである。

これら照射された線量の大きさは各々事前に予備照射実験を行い、即ち最も高い変異率の出ることが期待される線量範囲として定められたものである。

吸収線量(単位:グレイ)の値から生物学効果を示す線量当量(単位:シーベルト)に変換するには、放射線の種類によって異なる線質係数をそれらに掛けることによって得られる。

重粒子線の場合は、線質係数は20と設定されており、よって

アサガオ: $50(\text{Gy}) \times 20 = 1,000 (\text{Sv})$

ミヤコグサ: $20(\text{Gy}) \times 20 = 400 (\text{Sv})$
となる。

5. 宇宙フライト種子群と地上照射種子群のそれぞれの被曝線量比較

地上照射試料の被曝の仕方は高線量(高い値の放射線)を急速に照射したもの、すなわち高線量急照射であり、一方、宇宙フライト種子は比較的低い放射線量を休みなく継続して浴びたものの総和である(低線量長期被曝)。

種子を試料とした場合、それら被曝の仕方が違おうと全く同じメカニズムで影響が及ぶ(例えば変異の出やすさ等)とは考えられていないが、とはいうもののそれらがまた決定的に大きく違おうとも考えられてはいない。

単純にそれら数字を比較すると、例えばアサガオにおいて地上照射群の種子は宇宙フライト種子の7, 400倍もの放射線量を浴びたこととなる。

6. 放射線急照射による植物種子の変異発生率

人為的処置によって誘発された突然変異を品種改良に利用する“突然変異育種”の分野では、今日に至るまで様々な種類の植物種子を対象にした放射線変異に関する膨大なデータ、実験結果が報告されている。その結果、例外的に最も高い頻度で得られる葉緑素突然変異(chlorophyll mutation: そのほとんどが幼苗期を過ぎると枯死する)を除けば変異の発生率は 10^{-3} (千分の1)から 10^{-6} (100万分の1)の範囲に入り、その多くが 10^{-4} (一万分の1)から 10^{-5} (10万分の1)となることが既に知られている。

最適被曝量の範囲の外では、即ち被曝放射線量がより大きくなるレンジでは試料の遺伝子以外への障害や結実する前に死滅する割合が高くなっていき、またより小さい被曝量となる範囲では肝心の変異の発生率がより小さくなっていく。

7. JAXA 宇宙教育センター宇宙ステーション教育事務局の本教育プログラムでの変異発生率にかかる事前予想

本教育プログラムにおける試料、アサガオ、ミヤコグサ共に宇宙フライト、地上対照、及び地上照射の群のそれぞれの種子の総数は千の桁(10^3)の範囲である。よって地上照射群においてさえ放射線被曝によって生じる変異体の出現率は、確実と言う点からみれば全く同一の実験を場合によっては千回繰り返して、その全体の中に1つかそれ以上の変異体が出現するレベルになると見積もられた。

最適放射線量からは千分の1以下となる被曝量となる宇宙フライト種子の変異体発生率に到っては、起こる可能性は当然極端にさらに小さくなることが想像された。

JAXA 宇宙教育センター・宇宙ステーション教育事務局は、種子の宇宙放射線被曝によ

って出現する変異体の割合は極端に小さいものであることを御参加頂いた生徒さん達、先生方が実際の体験を通して実感され、即ち変異と言う現象に関して御参加された各位の科学的に正しくご理解されることを期待、想定したものである。

8. 植物の出自の違いによる変異体の出やすさ・出にくさ

一方、野生の植物と数千年にも及ぶ長きに渡って人の手により栽培が繰り返されてきた、いわゆる栽培植物とではその変異体の出現率が一般的に大きく異なることが知られている。人々が望むような性質、あるいはそれに近い性質を持つ植物個体を選別しさらにそこから種子を取ってはまた栽培し増やすと言う、気の遠くなるような地道な作業を人間が世代を越え引き継ぎ繰り返してきた結果、変異の出やすさにおいて野生種とは大きく異なる特徴を獲得してきた結果であると考えられている。

そのため、こうした放射線等による変異誘導とは異なる別のメカニズムで、栽培種であるアサガオとまだほとんど野生種に近いミヤコグサとでは変異体出現率が根本から違っている点も見込まれ、さらに栽培植物アサガオの中でもムラサキと言う純系品種は特にトランスポゾンという遺伝子が動き易い性質を持ちことがすでに明らかとされており、即ちそうした物の中においてもより変異の出やすいことが報告されていた。

実際、今回の実験でアサガオ“ムラサキ品種”からは変異体の出現が 2 例明らかとなったが、一方ミヤコグサからは変異体の報告は依然としてなしである。

9. 今回のアサガオ変異体出現の理由調査

JAXA 第 1 回宇宙種子実験において 2 例の変異体(1つは宇宙フライトアサガオ種子の M2 から、もう1つは地上照射群のアサガオ M2 から)の出現が専門委員により確認され、それぞれ遺伝子の解析を本教育プログラム専門委員の研究者方によって進められている。その明らかとされる遺伝子構造の変化から実際変異を生じさせた原因、メカニズムに関してもある程度の推定を可能とする情報の得られることが期待される。

それらの詳細に関してはおって最終報告の中でお示しする予定であるが、本説明資料の中で簡略的に御紹介した通り、宇宙フライト群から得られたアサガオ変異体は宇宙放射線によるものではないと 100%断言はできないものの、その可能性は実際圧倒的に誠に小さく、即ちそれが原因ではないだろうと現在、本教育プログラム専門委員をお勤め頂いた本分野トップランナーの研究者先生方、ならびに JAXA 宇宙ステーション教育事務局担当では見積もっている。