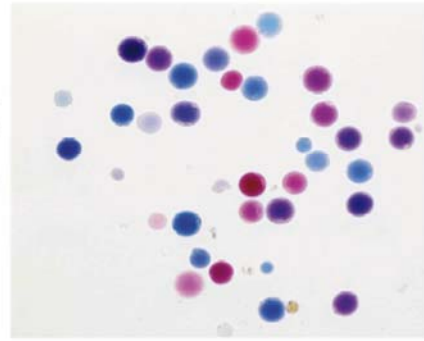


紫色のアジサイガク片



プロトプラスト混合物



酵素処理



紫色のアジサイガク片から得た色とりどりの細胞の一つで、色、液胞pH、アントシアニン、助色素、アルミニウムを分析し、何が発色を決定するかを明らかにした。

アジサイの色は細胞ごとに変化する ～単一細胞分析でそのしくみを解明～

名古屋大学大学院情報学研究科の吉田 久美 教授らの研究グループは、アジサイの色変異が起きるしくみを明らかにしました。アジサイは日本原産で、原種の色は青色です。花言葉は「移り気」で、花色が容易に変わることもよく知られています。アジサイの花色には土壌環境が影響します。酸性土壌では青くなり、中性土壌では赤くなります。ところが、青色品種のアジサイを中性土壌で育てると花（装飾花で実際はガク片）は紫色になります。さらに、その細胞を見ると、青、赤、紫色の細胞がモザイク状に散らばっていることがわかりました。

そこで、この紫色のガク片を酵素で処理して、細胞をバラバラにしました。すると、青、赤、紫の細胞と無色の細胞が混ざって得られました。この中から色のついた細胞を一つ選びその色を測定した後に分析を行い、細胞の色と成分との間にどのような関係があるかを明らかにしました。その結果、細胞の色に関係無く同じアントシアニン¹⁾が含まれ、アルミニウムイオンは細胞が青ければ青いほど多くなること、さらに、特定の助色素分子²⁾も細胞が青ければ青いほど多くなることがわかりました。隣合った細胞はほぼ同じ環境下にあり、同じゲノムを持ちます。それがなぜこれほど違う性質を持つようになるのかの解明は、これからの課題です。

本研究成果は、2020年12月19日付英国植物科学専門誌『New Phytologist』オンライン版に掲載されました。本研究は、文部科学省科学研究費補助金、および民間財団の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- ✓ アジサイの花色は土壌の酸性度によって青、紫、赤と色変化することがよく知られているが、全ての色は、デルフィニジン 3-グルコシドという単純な化学構造のアントシアニンが担っている。
- ✓ アジサイの青色発色にはアルミニウムイオンが必要であることが昔からわかっていたが、色の変化するしくみは不明だった。
- ✓ 青色アジサイにアルミニウムイオンを加えずに育てると紫色の花となり、それを顕微鏡で観察すると、青、紫、赤色の細胞が混ざったモザイク状だった。
- ✓ それぞれの色の細胞を、別々にひとつひとつ採取して1細胞の成分を分析することにより、異なる色が発色する仕組みを明らかにした。

【研究背景と内容】

アジサイの花は色が移り変わることでよく知られる植物です。花とされている部分は、装飾花で実際はガク片です。酸性土壌で青色、中性土壌で赤色になることは古くから明らかにされてきました（図1）。また、購入した鉢を庭に植えると色が変わってしまうことを経験された方も多いと思います。ところが、こうして得られた紫色のアジサイ（図2左）のガク片を顕微鏡で観察すると、紫色の細胞の集まりではなく、青色、紫色、赤色のとりどりの色の細胞が集まって、モザイク状であることがわかりました（図2右）。つまり、アジサイの花色は、株ごとや玉、花ごとではなく、細胞ごとに変化することがわかりました。

ところが、アジサイの成分はどんな色の花でも同じであることがわかっています（図3）この細胞ごとの色の変化の仕組みを探るためには、ガク片から酵素を用いて細胞をバラバラにして³⁾、その一つ一つの色の測定と成分の計測が必要です。今回、単一細胞分析という方法を開発してこれを行いました（図4）。紫色のガク片を酵素処理すると、様々な色の細胞（細胞壁を持たないプロトプラストと呼ばれる細胞）が得られました（図4左）。ガク片の表層の細胞は無色のため、無色の細胞も含まれています。

ここから、一つの細胞を選び、（1）細胞の色⁴⁾、（2）細胞のpH⁵⁾、（3）アントシアニンの量、（4）アルミニウムイオンの量、（5）助色素の量を計測しました。細胞はとても小さく、直径はおよそ30~40マイクロメートル程度です。したがって成分を定量するた



図1. 土壌の酸性度とアジサイの花色の関係。



図2. 紫色アジサイの花とガクの顕微鏡観察。

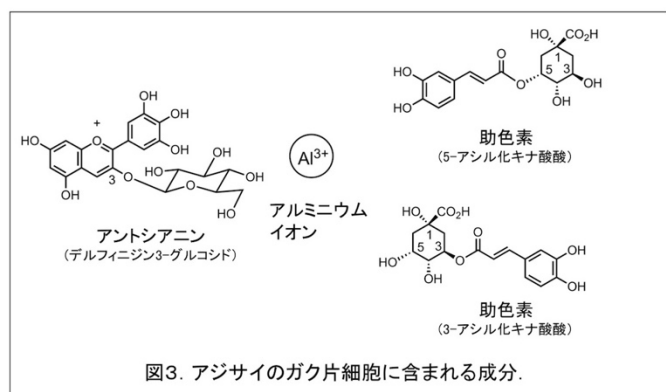


図3. アジサイのガク片細胞に含まれる成分。

めには、非常に高感度な分析法の開発が必要でした。

細胞の色とこれらの成分などの関係を調べた結果、細胞の色が青くなればなるほど、アルミニウムイオンの量が多くなること、および3種類ある助色素のうち特定の構造の助色素(5-アシル化キナ酸⁶⁾)が増加していることがわかりました(図5)。一方、アントシアニンの量や細胞の pH は細胞の色と連動した変化はありませんでした。

さらに得られた実験データを元に、試験管内で成分を混合しました。その結果、条件を様々に変化させると、アジサイの青、紫、赤色の全ての色を再現できることが確かめられました。しかも、助色素の混合比や溶液の pH をわずかに変化させると、色は連続的に変化しました。アジサイは、これらの要因(アルミニウムイオン、助色素、細胞 pH)の組合せによって花色が決まるため、移り変わりやすいことがわかりました。

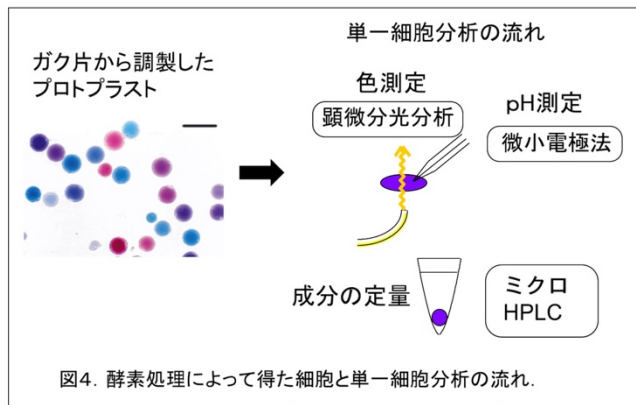


図4. 酵素処理によって得た細胞と単一細胞分析の流れ。

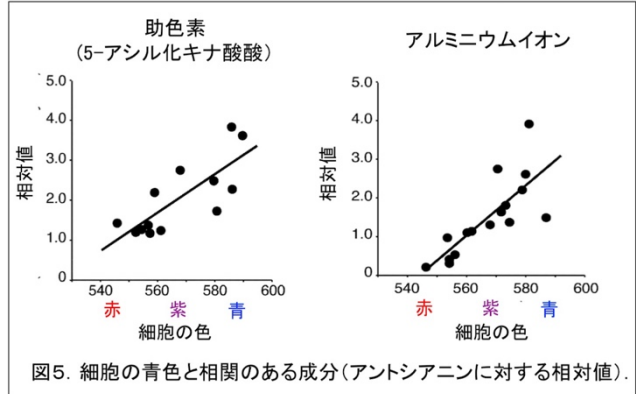


図5. 細胞の青色と相関のある成分(アントシアニンに対する相対値)。

【成果の意義】

なぜアジサイの色は容易に移り変わるのか、という長年の疑問に答えることができた研究成果です。同じアントシアニンが、アルミニウムイオン、助色素の組成、液胞 pH という他の要因の組合せによって多彩な色を発色することを明らかにしました。また、単一細胞で高感度分析の手法が開拓できたことは、今後、これを用いて様々な分野での微量分析が可能となります。

隣同士の細胞は、同じ遺伝子を持ち、置かれた環境もほぼ同じです。すなわち、一つの過程で育った一卵性双生児のような関係になります。それがなぜ、違う性質(表現系、この場合は色)を示すようになるのかという、遺伝要因と環境要因の関係を解明する材料としてもうってつけであると考えられます。

【用語説明】

- 1) アントシアニン：植物色素で主に花、葉、果実などの赤から紫、青色を示す色素の総称である。青色の花のほとんどはアントシアニンにより発色する。
- 2) 助色素分子：分子自体は無色であるが、アントシアニンと共存することにより、アントシアニンの発色を安定化させ、より青色にする効果を持つ物質のこと。
- 3) 細胞をバラバラにする：ガク片は多細胞からできており、細胞どうしがペクチンと呼ばれる多糖で接着されている。さらに、ひとつひとつの細胞は細胞壁という堅い鎧のようなもので保護されている。これらを溶かす酵素で処理すると、バラバラになっ

たプロトプラストと呼ばれる細胞の混合物となり、これを実験に用いた。

- 4) 細胞の色：目視でもわかるが、光束を 10 マイクロメートルに絞った光を細胞に照射して吸収スペクトルを測定し、その数値を色の指標とした。
- 5) 細胞の pH：色がついているのは、細胞の中の液胞とよばれる大きな袋で、ここへ、先端が 1 マイクロメートル程度の非常に細い電極を差し込んで pH（水素イオン濃度）を測定した。
- 6) 5-アシル化キナ酸：図 3 に示した構造を持つ分子

【論文情報】

雑誌名：New Phytologist オンライン版

論文タイトル：Single-cell analysis clarifies mosaic color development in purple hydrangea sepal

（単一細胞分析により、紫色アジサイガク片におけるモザイク状の色発色にしくみを解明）

著者：Kumi Yoshida（名古屋大学教授）, Daisuke Ito,（名古屋大学大学院生）, Naoko Miki（名古屋大学技術補佐員）, Tadao Kondo（名古屋大学客員教員）

DOI：10.1111/nph.17099