

ヤブツバキ‘千年藤紫’の紫色 花色とアルミニウム

農研機構 野菜花き研究部門
品質育種ユニット

谷川 奈津

1. はじめに

ヤブツバキ (*Camellia japonica* L.) は、日本の本州以南に広く自生し、早春を象徴する花として古くから日本人に親しまれている。現在何千種類とあるツバキの園芸品種の多くは、ヤブツバキをもとに成立したものであり、白や桃、赤、紅色の花色がある。ツバキの園芸品種には紫や青い花色が無い。中国南部を中心に東～東南アジアにかけて200種以上存在するとされるツバキの仲間(ツバキ属植物)に、紫や青い花色を持つ種は見つかっておらず、紫や青色花色品種の作出は、ツバキの育種における大きな「夢」である。

野生ヤブツバキの花は、通常赤色である。ところが稀に、紫色の花を咲かせるヤブツバキが発見されることがある。この紫色花色は珍しく、園芸的にみても非常に高い価値をもつので、挿し木や接ぎ木によって増殖され、品種名がつけられたものもあり、‘千年藤紫’、‘青い珊瑚礁’、‘大社紫’などが知られている。しかし、たいへん残念なことに、これらの紫色花色は、常に安定して発現する性質のものではない。赤紫色や、通常のヤブツバキと変わらない赤い花を咲かせる場合も多いことがわかっている。土壌や気候の影響が推定されているものの(横山・桐野 2005)、紫色を発現する条件は明らかではない。

赤～青色系の花色は、多くの場合アントシアニンによるものである。ヤブ



図-1 ‘千年藤紫’の花
左から、赤色花、赤紫色花、紫色花(原図は Tanikawa *et al.* 2016 より)

ツバキの花の色素もアントシアニンである。近年、アントシアニンが紫や青い花色を発現するには、①アントシアニンの構造、②アントシアニンが蓄積する液胞内のpHが高い、③桂皮酸誘導体やフラボン、フラボノールなど、アントシアニンと相互作用して青色化を引き起こす化合物(コピグメント co-pigment)の存在、④アントシアニンとの相互作用によって青色化を引き起こす金属イオンの存在、のいずれか、あるいは複数の条件が関与することが示されている(Yoshida *et al.* 2009)。これらの条件を踏まえて、筆者らは、ヤブツバキの紫色花色がどのようなメカニズムで発現するのかを明らかにするため、紫ヤブツバキ品種‘千年藤紫’の紫、赤紫、および赤色の花を用いて分析を行った(Tanikawa *et al.* 2016)。本研究から、‘千年藤紫’の紫色発現にはアルミニウムイオンが関与すると考えられる結果が得られたのでご紹介したい。

2. ‘千年藤紫’の花色と花弁表皮細胞の観察

‘千年藤紫’は、長崎県島原半島の野生ヤブツバキから発見されたもので、発見時の原木の花は見事な紫色であったという(横山・桐野 2005)。筆者らが研究に用いた3個体の‘千年藤紫’(個体1, 2, 3)では、図-1のような赤色、赤紫色、紫色の花が開花した。

アントシアニンは花弁の表皮細胞の液胞に局在する。‘千年藤紫’の異なる花色の花弁表皮を顕微鏡で観察すると(Tanikawa *et al.* 2016)、赤色花弁では、表皮細胞が一様に赤色であった(図-2a)。一方、赤紫色花弁の表皮細胞では、赤色の部分と紫色の部分とが混在しており、多くの紫色の細胞には青黒い粒子が観察された(図-2b)。また、紫色の細胞は維管束の周囲に広がっている特徴があった。紫色の花弁では、より多くの表皮細胞が紫色であり、やはり多くの紫色の細胞に青黒い粒子が観察された(図-2c)。これら

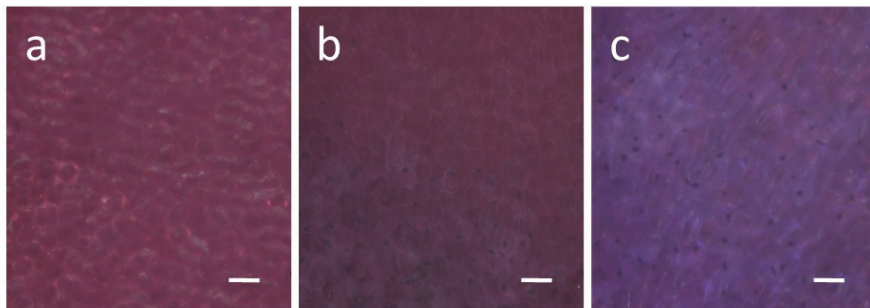


図-2 ‘千年藤紫’の花弁の表皮細胞

(a) 赤色花, (b) 赤紫色花, (c) 紫色花, スケール = 100 μ m (原図は Tanikawa *et al.* 2016 より)

の観察から, ‘千年藤紫’の花弁では, 均一に表皮細胞の色が変化するのではなく, 維管束周囲の細胞から紫色になり, 紫色の細胞の増加にともなって, 全体的な見た目として紫色味が増していくという発色をすると考えられる。

3. アントシアニン組成と含有量

2つ以上の芳香族有機酸 (*p*-クマル酸やコーヒー酸など) が結合するアントシアニンは, 結合のないものと比べて青味の強い色を発色する場合があります, 多くの紫や青い花の色素として報告されている (Honda and Saito 2002)。ヤブツバキの花の主要アントシアニンは, 芳香族有機酸が1つも付いていないシアニジン 3-グルコシド, シアニジン 3-ガラクトシド, および芳香族有機酸が1つだけ結合するシアニジン 3-*p*-クマロイルグルコシドの3種類で (Saito *et al.* 1987;

坂田 1988), いずれも単純な構造のアントシアニンである (図-3)。

‘千年藤紫’の花弁のアントシアニンを分析したところ, 赤, 赤紫, 紫のいずれの花色でも, 一般的なヤブツバキと同様の成分が検出された (Tanikawa *et al.* 2016)。シアニジン 3-グルコシドおよびシアニジン 3-*p*-クマロイルグルコシドが主要成分であり, シアニジン 3-ガラクトシドの割合は低かった (図-4)。これらの成分の含有量, あるいは総アントシアニン含有量に, 花色の違いに対応する違いはみとめられなかった (図-4)。

4. 花弁の搾汁 pH

アントシアニンには, 溶液の pH に応じて色が変わり, pHが高くなるほど青味が強くなる性質がある。つばみの時は赤紫色で, 開花すると青色になるアサガオの花弁変化は, 液胞内 pHの上昇によるものである (Fukada-

Tanaka *et al.* 2000; Yoshida *et al.* 1995)。

‘千年藤紫’の花弁搾汁の pH を測定したところ, 赤色花が 4.5 ~ 4.7, 赤紫色花が 4.6 ~ 4.7, 紫色花が 4.8 であった (Tanikawa *et al.* 2016)。異なる花色間で大きな違いがなかったため, ‘千年藤紫’の紫色発現には pH は関与していないと考えられた。

5. 桂皮酸誘導体やフラボン・フラボノール

それ自体はほとんど~全く無色である桂皮酸誘導体, フラボン, フラボノールなどが相互作用して, アントシアニンの発色を青色化, 濃色化, 安定化する効果を与える場合がある (コピグメント効果)。この現象は多くの紫や青色花色の発現に関与している (武田 2013)。

‘千年藤紫’の花弁の桂皮酸誘導体, フラボン, フラボノール類について分析したところ, いずれの花色の花弁でも, 極めてわずかに検出される程

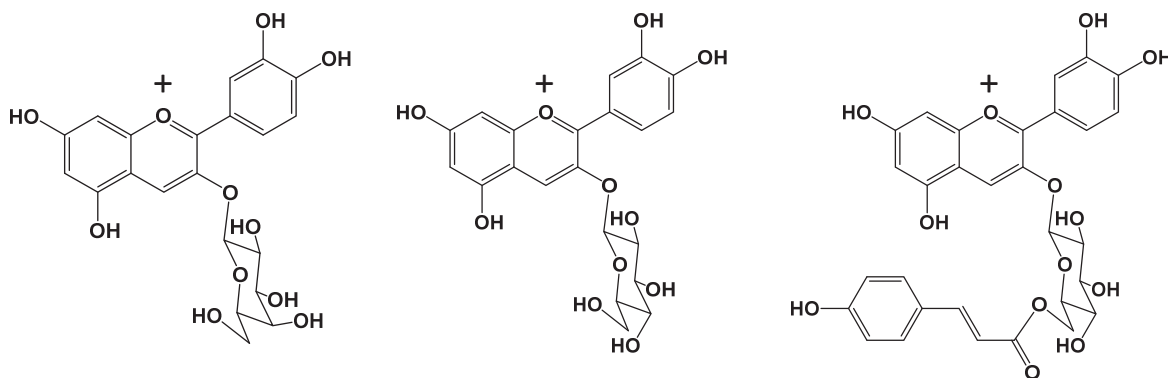


図-3 ヤブツバキの主要アントシアニン

左から, シアニジン 3-ガラクトシド, シアニジン 3-グルコシド, シアニジン 3-*p*-クマロイルグルコシド

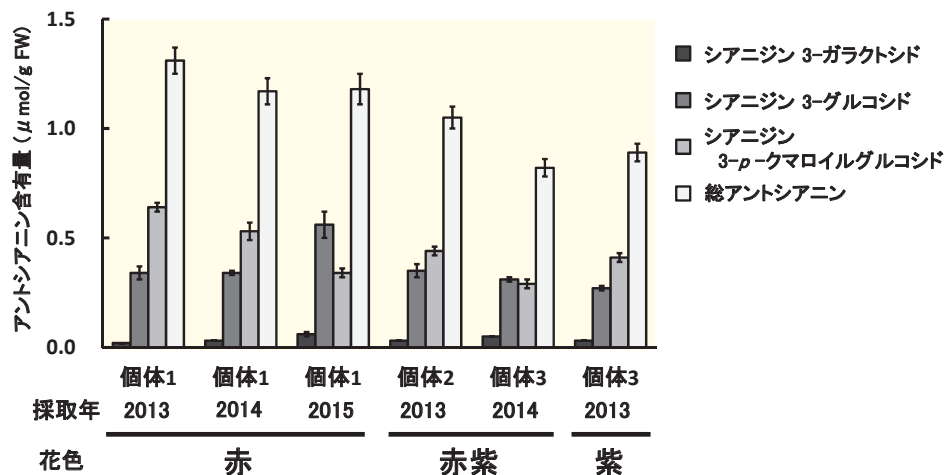


図-4 ‘千年藤紫’の赤色花、赤紫色花、紫色花の花弁におけるアントシアニン成分および総アントシアニン含有量 (Tanikawa *et al.* 2016 より作成)

度であった (Tanikawa *et al.* 2016)。したがって、‘千年藤紫’の紫色発現は、桂皮酸誘導体、フラボン、フラボノールが関与するコピグメント効果によるものではないと考えられた。対照として野生型の赤花ヤブツバキ2系統についても分析しており、これらの花弁でも、桂皮酸誘導体、フラボン、フラボノール類はごく僅かに検出される程度であった。白花のヤブツバキ花弁でも同様の結果が得られており (Tanikawa *et al.* 2008)、ヤブツバキは、花弁に桂皮酸誘導体やフラボン、フラボノール類をほとんど生合成しない植物であると考えられる。

6. 金属イオン

マグネシウムやアルミニウムなど、2価あるいは3価の金属陽イオンが、青色花色の発現に関与する場合がある。ツユクサ (マグネシウム)、ヤグルマギク (マグネシウム、鉄、カルシウム)、アジサイ (アルミニウム)、ヒマラヤの青いケシ (マグネシウム、鉄)、ネモフィラ (マグネシウム、鉄) など、比較的鮮明な青色花色から報告されている (武田 2013; Yoshida *et al.* 2009)。

‘千年藤紫’の花弁のアルミニウム、カルシウム、マグネシウム、マンガン、

鉄、銅、亜鉛の含有量を分析したところ (Tanikawa *et al.* 2016)、カルシウム、マグネシウム、マンガン、鉄、銅、亜鉛は、異なる花色間でほぼ同様の含有量であったか、または含有量の違いと花色の違いとの間に対応がみられなかった。また、鉄、銅、亜鉛の含有量は、アントシアニン含有量に比べると非常に少なかった。一方、アルミニウム含有量は、異なる花色間で大きな違いがみとめられた (図-5)。花弁の紫色が強いほど高く、赤紫色花弁および紫色花弁のアルミニウム含有量は、それぞれ赤色花弁の4～10倍および14～21倍であった。‘千年藤紫’個体3の花色は、2013年は紫色であったのに、翌年は赤紫色程度になった。この花色の違いに対応して、2013年に比べて2014年の個体3の花弁のアルミニウム含有量が減少していた (図-5)。アントシアニン含有量に対するアルミニウム含有量の割合は、モル比で計算すると、赤色花弁では0.1～0.2、赤紫色花弁では1.0～1.9、紫色花弁では3.6であった。アントシアニンには、アルミニウムイオンをキレートして青色化する性質がある (Dangles *et al.* 1994)。アルミニウムイオンがアジサイの青色花色発現に関わっていることはよく知られている。ヤブツバキは、アジサイと同様、アル

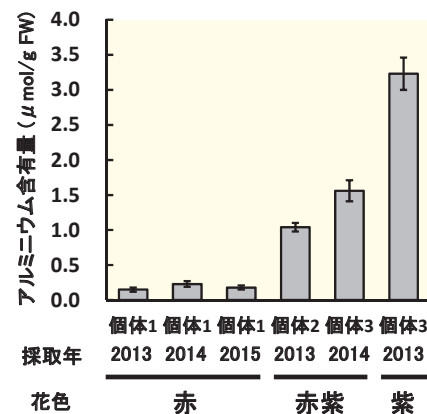


図-5 ‘千年藤紫’の赤色花、赤紫色花、紫色花の花弁におけるアルミニウム含有量 (Tanikawa *et al.* 2016 より作成)

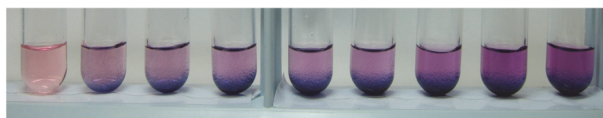
ミニウム蓄積植物である (山田 1980)。以上のことから、‘千年藤紫’の紫色花色発現にアルミニウムイオンが関与することが強く示唆された。

7. アントシアニンに対するアルミニウムの作用

図-6は、‘千年藤紫’の主要アントシアニンであるシアンジン 3-グルコシドを用いて、アルミニウムイオンによる発色の変化をみたものである。紫色花弁の搾汁液と同じ pH 4.8 の緩衝液中で、シアンジン 3-グルコシドに対して塩化アルミニウムがモル比で0～3倍の濃度になるように混合し、23°C、暗所で24時間平衡化した溶液の色と吸収スペクトルを調べた (Tanikawa *et al.* 2016)。塩化アルミニウムを加えない時、溶液は沈殿物のない透明な薄赤色であった (図-6a)。塩化アルミニウムの添加量が増えるにつれ、溶液の紫色が強くなり (図-6a)、溶液の吸収スペクトルの吸収極大も長波長側に移動した (図-6b)。また、塩化アルミニウムを加えると、花弁の紫色の表皮細胞で観察された粒子と類似した青黒い沈殿物が生じることが確認された (図-6a)。

一方で、花弁のアントシアニンおよ

(a)



(b)

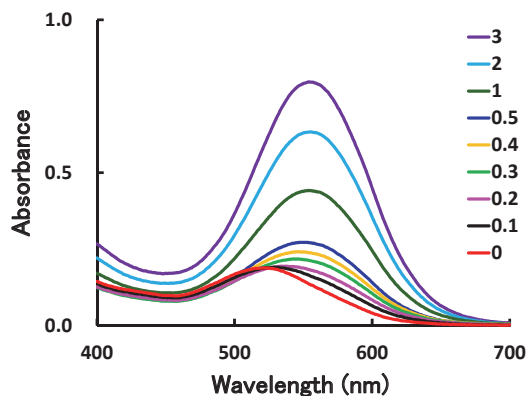


図-6 塩化アルミニウム/シアニジン 3- グルコシド溶液の色と吸収スペクトル

(a) アルミニウムイオン対シアニジン 3- グルコシドがモル比で 0 : 1 (左端), 0.1:1, 0.2:1, 0.3:1, 0.4:1, 0.5:1, 1:1, 2:1, 3:1 (右端) となるように混合し, 23°C, 暗所で 24 時間平衡化した溶液 (0.1 M 酢酸緩衝液, pH 4.8)。シアニジン 3- グルコシドの濃度は 0.15 mM 一定。(b) (a) の各溶液の上清の吸収スペクトル。スペクトルの数字はシアニジン 3- グルコシドに対するアルミニウムイオンのモル比。(原図は Tanikawa *et al.* 2016 より)

びアルミニウム含有量と同じモル比で混合した溶液は, 花卉と比べて, より青味の強い紫色を呈した (Tanikawa *et al.* 2016)。実際の花弁では, アルミニウムイオンは, アントシアニン以外にも有機酸などの他の化合物にキレートされることが考えられる (Ma 2000)。また, ヤブツバキと同じツバキ属の仲間であるチャ (茶 *C. sinensis* (L.) O. Kuntze) の葉では, アルミニウムの大部分が, 液胞ではなく, 表皮細胞の細胞壁に蓄積することが報告されている (Tolra *et al.* 2011)。「千年藤紫」の花弁でも, 液胞中のアルミニウム量は, 花卉全体を分析して得た今回の値よりも少ない可能性がある。こうした理由によって, 花卉と実験的に調整した溶液とで紫色の強さに相違が生じたと推測している。これについては, より詳細な研究が必要である。

8. 結論

筆者らは以上の結果を総合し, 「千年藤紫」の紫色花色は, アントシアニンがアルミニウムイオンをキレートすることによって発現すると結論した

(Tanikawa *et al.* 2016)。「千年藤紫」と同様の不安定な紫色を発現する他のヤブツバキの花色も, 同様のメカニズムによると考えられる。以前, 本誌にて, 黄花ツバキのキンカチャ (金花茶, *C. chrysantha* (Hu) Tuyama) の濃黄色花色は, フラボノールがアルミニウムイオンをキレートすることにより発現することを示した筆者らの研究を紹介した (Tanikawa *et al.* 2008; 谷川 2009)。アントシアニンもフラボノールもフラボノイドの仲間である。一連の研究で, ツバキ属植物には, こうしたフラボノイドとアルミニウムの相互作用による花色発現メカニズムが存在することが示された。また, 金属イオンとアントシアニンによる花色発現は, これまで, かなり青い花色から報告されているが, 紫色花色にも存在することが示された。

おわりに

ヤブツバキはアルミニウム蓄積植物である。では, 通常の真っ赤なヤブツバキの花弁に含まれるアルミニウム量はどれくらいか, ということが疑問に

なる。対照として分析した野生型の赤花ヤブツバキ 2 系統の花弁では, 「千年藤紫」の赤紫色花色の花弁と同程度のアルミニウムの蓄積がみとめられた (Tanikawa *et al.* 2016)。上記 7. の調整溶液の実験から示されるように, アルミニウムイオンがアントシアニンと共存すれば, 紫色味を発色すると考えられるので, ヤブツバキが真っ赤な花を咲かせることにも, 何か巧妙な生理的仕組みがあるのかもしれない。紫色を発現する「千年藤紫」と通常のヤブツバキとの違いはどこにあるのか。筆者の推論になるが, まず, 「千年藤紫」は比較的高い花卉へのアルミニウム蓄積能力をもつことが考えられる。また, 「千年藤紫」にはアルミニウムが表皮細胞の液胞内に取り込まれやすい性質があることや, アントシアニンと競合してアルミニウムイオンをキレートする化合物が少ない可能性なども考えられる。今後, 液胞だけを取り出して分析をするなどの研究が進めば, 正確なメカニズムが解明されるものと考えられる。いつの日か, 毎春変わらず美しい紫色の花を咲かせるツバキが誕生することを期待している。

引用文献

- Dangles, O. *et al.* 1994. Kinetic and thermodynamic investigation of the aluminium-anthocyanin complexation in aqueous solution. *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2*, 2587-2596.
- Fukada-Tanaka, S. *et al.* 2000. Colour-enhancing protein in blue petals. *Nature* 407, 581.
- Honda, T. and N. Saito. 2002.

Recent progress in the chemistry of polyacylated anthocyanins as flower color pigments. *Heterocycles* 56, 633-692.

Ma, J. F. 2000. Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants. *Plant Cell Physiol.* 41, 383-390.

Saito, N. *et al.* 1987. Cyanidin 3-p-coumaroylglucoside in *Camellia* species and cultivars. *Phytochemistry* 26, 2761-2762.

坂田祐介 1988. ツバキ属植物の花色素に関する研究—とくに系統発生との関連について—. *鹿大農学術報告* 38, 9-62.

武田幸作 2013. 植物色素フラボノイド (武

田幸作・齋藤則夫・岩科司著). 文一総合出版. pp. 245-270.

Tanikawa, N. *et al.* 2008. A peculiar yellow flower coloration of camellia using aluminum-flavonoid interaction. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 77, 402-407.

谷川奈津 2009. キンカチャの黄色花色の発色におけるアルミニウムの関与. *植調* 43, 341-347.

Tanikawa, N. *et al.* 2016. Aluminum ions are involved in purple flower coloration in *Camellia japonica* 'Sennen-fujimurasaki'. *Hort. J.* 85, 331-339.

Tolra, R. *et al.* 2011. Localization of aluminium in tea (*Camellia sinensis*)

leaves using low energy X-ray fluorescence spectro-microscopy. *J. Plant Res.* 124, 165-172.

山田秀和 1980. ツバキ科植物のフッ素吸収に関する生物地球化学的研究. *京都府大学報・農* 32, 138-170.

横山三郎・桐野秋豊 2005. 日本の椿花 園芸品種 1000. 淡交社.

Yoshida, K. *et al.* 1995. Cause of blue petal colour. *Nature* 373, 291.

Yoshida, K. *et al.* 2009. Blue flower color development by anthocyanins: from chemical structure to cell physiology. *Nat. Prod. Rep.* 26, 884-915.

統計データから

平成 28 年度水稲除草剤出荷量データ (植調協会調べ)

水稲作付面積が前年比 99 のなか、出荷金額比は 99、出荷数量比は 96 と減少している。出荷されている製品のうち、一発処理剤は 378 剤と全体の 7 割強を占め、初期剤は 62 剤、中・後期剤は 51 剤である。各剤の標準的な使用量(kg, L/ha)をベースに出荷数量を割り求めた推定使用面積では、一発処理剤が 6 割を占め、前年比も 101 と広く使用されている。初期剤、中・

後期剤はそれぞれ 2 割程度であるが、初期剤は前年比 92 と減少が目立つ。

水稲作付面積 (100) に対する水稲除草剤の普及割合をみると、全体で 181 となり、平均的な水稲除草剤の使用回数は 1.8 回程度になる。また、表-2 に示すように、除草剤の使い方には、地域による特徴がある。(K.O)

表 - 1 平成 28 年度 水稲除草剤出荷数量・金額と推定使用面積 (平成 27 年 10 月～平成 28 年 9 月末)

処理剤	剤数	割合 (%)	出荷数量 (製品kg, L)	割合 (%)	総金額 (千円)	割合 (%)	推定使用面積 (ha)	割合 (%)	前年比
一発処理	378	77	14,318,198	57	41,751,844	71	1,739,932	60	101
体系(初期)	62	13	4,209,155	17	5,833,120	10	564,692	19	92
体系(中・後期)	51	10	6,639,691	26	11,010,063	19	611,906	21	98
合計	491	100	25,167,044	100	58,595,026	100	2,916,529	100	
前年比	105		96		99		98		

表 -2 水稲除草剤処理方法別の普及割合 (平成 28 年度：地域別)

	全国合計 (1,611,000ha)	北海道 (108,300ha)	東北 (414,000ha)	北陸 (213,400ha)	関東 (303,100ha)
一発処理	108	100	112	112	110
体系処理(初期)	35	41	43	46	35
体系処理(中・後期)	38	21	37	53	51
総計	181	162	192	210	196

	東海 (102,000ha)	近畿 (107,000ha)	中国 (113,200ha)	四国 (54,100ha)	九州 (196,300ha)
一発処理	112	103	113	95	97
体系処理(初期)	30	29	44	9	11
体系処理(中・後期)	46	23	42	14	22
総計	188	155	200	119	130