

酸性雨水によるアサガオ花卉の脱色について

野内 勇 小山 功
大橋 毅 古明地 哲人

1 はじめに

わが国、北米、欧州において降水の酸性化が進行しているが、酸性化した降水は陸水生態系、森林生態系、農作物等に種々な悪影響をおよぼしている。^{1, 2)} 酸性雨は河川や湖沼を酸性化させ魚類や水生生物を減少させる。さらに、土壌から有効塩基やカチオンの溶脱を増加させ森林や農作物生産を減少させたり、岩石、土壌や湖沼底質から重金属溶離を増加させ、動植物に障害をおよぼしている。また、酸性雨は石造建築物や銅像のような文化財や建築物の腐食を促進していることも報告³⁾されている。

酸性雨の植物に対する直接的な影響は葉や花卉の壊死斑の発生の急性的障害と生長への慢性的障害の両者がある。酸性雨による葉の壊死斑の発生は、最もよく調べられている。多くの報告では人工酸性雨水の降雨量、降雨時間、降雨回数などに差異はあるものの、pH 3.0以下で壊死斑が発現するとほぼ一致している。^{4, 5, 6)} マツなどの森林樹木の生長におよぼす酸性雨の影響については、実験的にも野外調査においても今だ明確になったとは言い難い。Wood & Bormann はカバノキとマツの幼植物を用いて10～20週間程度酸性雨水を散布し生長量を測定したが、カバノキ⁷⁾とマツ⁸⁾では逆の結果を報告している。カバノキに11週間硫酸液を散布した実験では、pH 3.0で可視害がみられたが生長にはほとんど影響がなく、pH 2.3以下でのみ生長に大きな減退があった。しかし、マツの20週間の酸性液の散布では、pH 2.3では葉面可視害が発生し、土壌から多量の有効塩基 (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) が溶脱するにもかかわらず全処理区 (pH 4.7, 4.0, 3.3, 3.0, 2.3) 中生育は最高であったと報告している。後者のpHの低下に伴ってかえって生育が良好となった原因は、人工酸性雨の一成分として加えた NO_3^- の窒素施肥効果が強く現われたためと考えられており、⁸⁾

樹木に対しては20週間程度の実験では短期的な影響しか見られなかったのかもしれない。

農作物の生長・収量におよぼす酸性雨の影響では、収量が低下するとの報告が多い。1970年初め頃、ハワイのキラウエア火山起源の酸性雨 (pH 4.0で SO_4^- と Cl^- を多く含む) がトマトの花粉の発芽や花粉管の伸張阻害などを通してトマトの収量が低下した。⁹⁾ Hindawi ら⁵⁾ はインゲンマメの葉重とさや重が酸溶液のpH低下 (pH 2～4) によって減少することを、Harcourt & Farrar¹⁰⁾ はハツカダイコンの葉と根の生長がpH 2.5で減少したことを報告している。Lee⁴⁾ らはポット栽培した28種の農作物にpH 3.0, 3.5, 4.0の硫酸酸性水とpH 5.6のコントロール雨水を1日1.5時間、毎週3回散布を行い、市場流通部分の新鮮重と乾物重の収量を測定した。酸性雨水処理で収量の増加や減少が見られるものやほとんど変化のないものの3通りの現象がみられた。収量の増加は単子葉植物と双子葉植物の双方で認められたが、収量低下は双子葉植物のみに観察された。収量低下は5植物 (ハツカダイコン、サトウダイコン、ニンジン、カラシナ、ブロッコリー) であり、収量増加は6植物 (トマト、コショウ、イチゴ、カモガヤ、オオアワガエリ、アルファルファ) であり、あいまいなもの1種 (ジャガイモ) であり、オオムギ、コムギ、トウモロコシなどの穀類はほとんど変化を受けなかったことを報告している。

このように植物の葉や生長・収量への酸性雨の影響の調査研究はここ数年著しく増えているが、農業生産に直接関与しない花卉への影響に関する研究は、諸外国ではほとんど行われていず、わが国でもアサガオ、ツツジなどで酸性雨を知る指標的な価値として若干報告^{11, 12)}されているにすぎない。そこで著者らは酸性雨によって生じたとされているアサガオとツツジの花卉

の脱色現象を確認するとともに、酸性雨の指標としてツツジ科のオオムラサキとアサガオの花弁の酸性雨による脱色斑生成の調査を実施してきた。オオムラサキでは硫酸、硝酸、塩酸、酢酸など酸の種類を問わず、pH 2.6 以下で花弁に脱色斑が発現することをすでに報告³⁾してあり、ここでは、アサガオ花弁の脱色について報告する。

2 材料および方法

アサガオ花弁の脱色に関する調査は、1981年と1982年の両年にわたって実施した。赤玉土と黒ぼく土を1:1に混ぜたフラワーポット(94×24×25 cm)にアサガオ種子を5月中旬には種し、1ポットに3株ずつ育成した。供試したアサガオの品種は1981年スカーレットオハラ、キャロルバイオレット、ヘブンリーブルーであり、1982年はスカーレットオハラのみであり、添着実験は8月下旬から9月中旬にかけて行った。アサガオの花色は、スカーレットオハラは赤紫色、キャロルバイオレットは紫色、ヘブンリーブルーはうすい青色である。pH調整した酸性溶液と都内に降った雨水のアサガオ花弁の接触方法は前報のツツジ科のオオムラサキとはほぼ同様であり、毎朝9時に花を採取し、切花にした花弁にマイクロシリンジにて2~5 μ lの溶液の液滴を約50個ずつ添着し、室内に静置し、花色の変化を観察した。脱色斑点生成の有無は、液滴の蒸発(約1~2時間半)後に判定した。脱色斑点生成の評価は、添着した溶液により液滴のあった周辺がわずかに白色化するものを(+), 液滴部分が全体的にかすれたような円形のかすり状白色化を(++), 液滴部分が完全に真っ白あるいは茶褐色を帯びた白色化したものを(+++)として表わした。なお、黒っぽいしみ状のこんせきを残すものは脱色斑点とは区別し、変色斑点と称し、評価は(-)として表わした。

供試した人工酸性液は、1981年はpH 2.6からpH 4.0までの硫酸、硝酸、塩酸、過塩素酸、酢酸であり、1982年はpH 3.7からpH 5.0までの硫酸と硝酸の2種類のみであった。

3 結 果

(1) 脱色斑点の形状

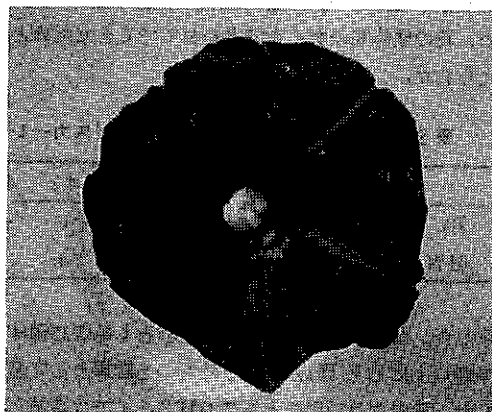
pH 2.0~2.6の低いpHの酸溶液では、スカーレットオハラ、キャロルバイオレットの赤紫色系の花弁

は、添着後5分程度で花弁が黄ダイダイに変色し、液の蒸発とともに茶褐色を帯びた脱色斑点であった。pH 3.0~3.3の酸溶液では、添着後10分程度でピンク色に変色し、60分後にはスポットの大きさと同じ大きさで、スカーレットオハラとキャロルバイオレットでは真白な白色の脱色斑点、ヘブンリーブルーで赤紫色を帯びた白色の脱色斑点を生じた。

pH 3.8以上の酸溶液では、添着後30分程度あまり変化は見せないが、40~50分後に液滴の周囲が白っぽく変色しはじめ、液が蒸発すると液滴の周辺が白く丸く白色に脱色したり、液滴部分が全体的に白くかすれたような脱色斑点となるものが多かった。なお、ヘブンリーブルーでは赤紫色の斑点であった。

硫酸、硝酸、塩酸、過塩素酸では、上述のような脱色斑点の生成は酸の種類により差異はなかったが、酢酸では脱色斑点の形状が若干異っていた。すなわち、pH 2.0~2.6では、花弁に添着した液滴部分が白く抜けることがなく、花弁全体が縮んでしおれてしまったり、pH 3.0~3.3では、液滴部分の中心部分が漂白され、その周囲に赤色の変色域が存在することなどであった。酢酸は弱電解質であり、強電解質の無機酸に比べ、低pHでは酢酸濃度が非常に高いための濃度障害によるものと考えられた。

pH 5.6程度の蒸留水の添着では、液滴が付着している間は、うすいピンク色の変色などが認められるが、多くは、液滴の完全な蒸発とともに変色斑は消失する。



pH 3.8の硫酸液を添着し、かすり状漂白(●)と一部分漂白(○)が生じたアサガオ花弁

しかし、なかには、黒っぽいしみ状の変色斑点やうすい白色の脱色斑点の発生することもあった。

(2) 酸の pH と脱色斑点の発生

1981 年に実施した pH 2.0~4.0 の硫酸、硝酸、塩酸、過塩素酸および酢酸に添着したアサガオ花卉の脱色斑点生成の結果を表 1 および表 2 に示した。スカ

ーレットオハラ、キャロルバイオレット、ヘブンリーブルーの 3 品種とも、ほぼ同じ pH 液で同様な脱色斑点を生成した。そして、これらアサガオ花卉の脱色斑点発生はいき値 pH は、酸の種類に関係なく、pH 4.0 程度であることがうかがわれた。pH 3.6 の酸溶液では添着した花すべてにかすり状の白色脱色斑点の発生

表 1 人工酸性溶液によるアサガオ花卉の脱色斑の生成

品 種	花 色	H ₂ SO ₄					HNO ₃					HCl				
		4.0	3.6	3.3	3.0	2.0	4.0	3.6	3.3	3.0	2.0	4.0	3.6	3.3	3.0	2.0
スカーレットオハラ	赤 紫	+	++	+++	+++	+++	+	++	+++	+++	+++	+	++	+++	+++	+++
キャロルバイオレット	紫	+	++	+++	+++	+++							++	++	++	+++
ヘブンリーブルー	うすい青		+	++	++	+++										

(+) ○ 一部分漂白 (++) ⊙ かすり状漂白 (+++) ● 全体が漂白

表 2 人工酸性溶液によるアサガオ花卉の脱色斑点の生成

品 種	HClO ₄					CH ₃ COOH					
	4.0	3.6	3.3	3.0	2.0	4.3	4.0	3.6	3.3	3.0	2.0
スカーレットオハラ	-	+	++	+++	+++	-	++	+++	+++	+++	花卉全体に縮み
キャロルバイオレット							+	++	++	+++	花卉全体に縮み
ヘブンリーブルー						-	+	++	++	+++	花卉全体に縮み

(+) ○ 一部分漂白 (++) ⊙ かすり状漂白 (+++) ● 全体が漂白 なお、HClO₄では pH 2.6, 3.0 で斑点の真中に赤紫色が残り、まわりが漂白された (●)。CH₃COOH では pH 3.0, 3.3 で、斑点の真中が漂白され、まわりに赤色の変色域があった。

があったが、pH 4.0 の酸溶液では添着した花のうち脱色斑点のまったく発生しない花も若干あった。すなわち、pH 4.0 が脱色斑点発生はいき値付近であるため、花の個体間差がここで表われてきたためと考えられた。

1982 年は脱色斑点発生はいき値 pH をより明確にするために、硫酸および硝酸の pH 値間隔を狭め、pH 3.6 から pH 4.5 までの 0.1 きざみの 10 段階および pH 4.7 と 5.0 の pH 液を調整し、スカーレットオハラのみを用いて同様な実験を行った。その結果は表 3 に

表 3 硫酸、硝酸液によるアサガオ (スカーレットオハラ) 花卉の脱色

	5.0	4.7	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7
H ₂ SO ₄	-	-	+	+	++	++	++	++	++	++
HNO ₃	-	-	+	+	+	++	++	++	++	++

(+) ○ 一部分漂白

(++) ⊙ かすり状漂白

示した。なお、供試個体数は各 pH ともほぼ 10 個体で半数以上に白色斑点が生じたものを結果として表わした。硫酸および硝酸ともに pH 3.9 までは供試した花すべてに確実にかすり状の白色脱色斑点や液滴の周辺一部の白色脱色が生じたが、pH 4.0 では約 2 割、

pH 4.1~4.3 では約 4 割には白色斑点は生じなかった。この白色斑点が生じないものは、しみ状の変色斑点を生じるものが多かった。また、pH 4.7 や pH 5.0 および蒸留水でも 1~2 割には液滴部分の一部やかすり漂白脱色斑点を生じるものがあった。

花により個体差があることから、アサガオ花卉の脱色斑点発生に明確ないき値 pH を決定することはむずかしいが、供試した花のうち半数以上に白色脱色斑点を生じた pH 4.3 程度が脱色斑点発生にいき値と見てよいであろう。

(3) 降水による脱色斑点の生成

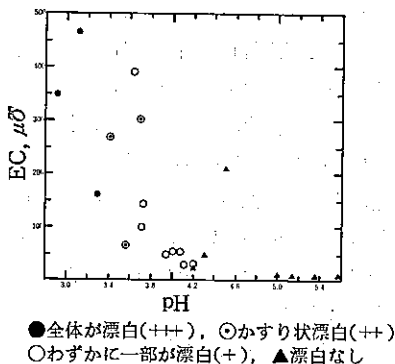
1981年～82年に採取した都内の降水21例（pH 2.9から5.6まで）をスカーレットオハラの花弁に添着し、実際に降った雨水によるアサガオ花卉の脱色反応と雨水の pH および EC（電気伝導度）との関係を検討した。その結果は図1に示した。明らかな白色の脱色斑点を発生した雨水の pH は 4.2 以下のものであり、pH 4.3 以上の雨水では白色に脱色されることはなく、黒っぽいしみ状の変色斑点の形状は、硫酸や硝酸の同一 pH 液による脱色斑点とほぼ対応していた。また、図1からも明らかのように、雨水によるアサガオ花卉の白色脱色斑点発生は雨水の pH に依存しており、EC とは直接の関連はなかった。

4 考 察

アサガオ花卉の花色素はアントシアニンであり、このアントシアニンは花弁の表皮組織に存在するのが普通である。アントシアニンは生体内では糖と結合した配糖体となって存在することが多く、糖を取除いた色素本体をアグリコン（アントシアニン）と称する。アサガオ花卉のアントシアニンは、ペラルゴニン、シアニン、ペオニンのわずかな種類であるが、これに結合する糖の種類や数でアントシアニンの種類は多い。また、アントシアニンの中にはケイ皮酸、p-クマル酸、カフェ酸などの有機酸でアシル化されたものがあり、アシル化アントシアニンと呼ばれている。これらのアントシアニンは酸性では赤色、中性ないし塩基性では紫～青色とその溶液の pH により指示薬的に変色する。本研究の主要な実験材料であるスカーレットオハラの花弁のアントシアニンは、6種類のアントシアニンが混在していることが報告¹⁴⁾されている。すなわち、アントシアニンはペラルゴニンで、糖はグルコースのみのペラルゴニングルコサイドであるが、グルコースの数および p-クマル酸、カフェ酸のアシル化により、6種類のアントシアニンが存在している。

花弁の細胞液の pH は、一般に花色に関係なく常に酸性であることが知られているが、アサガオのヘブン

リーブルーの青色花だけは pH 7.5 でアルカリ性である。¹⁵⁾ 花弁の搾汁の pH は必ずしも細胞液の pH を示しているとは言えないが、スカーレットオハラ花弁の搾汁液を測定したところ pH 5.9 であり、酸性であった。ヘブンリーブルーの青色花に酸性液を添着すると、



●全体が漂白(+++), ○わずかに一部が漂白(+), ▲漂白なし
 図1 アサガオ花卉の脱色と都内降水の pH および EC の関係

赤紫色を帯びた脱色斑点であったことは、花卉組織中に酸が浸透し、一部にアントシアンの変色反応が生じたことが考えられる。しかし、スカーレットオハラのような赤紫色系の花弁では、酸よっての白色への変色は考えられず、単なるアントシアンの変色反応ではない。

雨水によるアサガオやツツジの花弁の変色脱色は、雨水中に含まれる SO_3^{2-} の漂白作用によるとの説¹¹⁾もあるが、著者らのツツジおよびアサガオ花卉の酸性雨水の添着実験より、ツツジは pH 2.6 以下、アサガオは pH 4.3 以下で硫酸、硝酸、塩酸、酢酸など酸の種類にかかわらず、ほぼ同じ pH 液で同様な白色脱色斑点を発生することから、脱色斑点生成の原因は H^+ による花卉細胞からのアントシアニン色素の溶出や組織細胞の壊死に伴う何らかの反応であると推定された。

アサガオ花卉が酸性雨水によってどのようにして脱色あるいは変色するかというメカニズムは明らかではないが、近年、降る雨水の多くの pH が 4.0～5.0 であり、アサガオ花卉の脱色は酸性雨の指標として適すると思われる。しかし、アサガオ花卉は蒸留水あるいは汚染の少ない雨水でも、雨滴が十分に乾ききっていない間変色していることがあり、酸性雨水による脱色斑点（本報告では、脱色斑点は白く漂白された部分があることを称す）と誤認する可能性があり、雨上がり

のアサガオ花卉の観察には充分注意してみる必要がある。

5 ま と め

pH 2.0 から pH 5.0 までの硫酸、硝酸などの酸性溶液を調整し、アサガオ花卉にマイクロシリンジで 2 ~ 5 μ l ずつ約 50 個添着し、白く漂白される脱色斑の発生の有無を調査し、以下のような結果が得られた。

(1) 硫酸、硝酸、塩酸は酸の種類に関係なく、ほぼ同じように pH 4.3 以下で白色の脱色斑点を生じた。酢酸と過塩素酸では低い pH の 2.0 ~ 2.6 程度では白色の脱色斑点の周囲あるいは内部に赤色の変色域が見られ多少異なっていたが、pH 3.0 以下では硫酸や硝酸などとまったく同じ脱色斑点を生じた。

(2) 都内に降った雨水約 20 例 (pH 2.9 ~ 5.7) をアサガオ花卉に添着した。白い脱色斑点が生じたのは pH 4.3 以上の雨水では、脱色斑点は生じず、黒っぽいしみ状の変色斑点を生じるものが多かった。

(3) 以上の酸性溶液および降水のアサガオ花卉への添着実験より、アサガオ花卉の脱色斑点は、pH 4.2 ~ 4.3 以下の雨水で発生することが判明した。

参 考 文 献

- 1) Odén, S.: The Acidity Problem—An Outline of Concepts, Water, Air, and Soil Pollution, 6, 137 - 166 (1976).
- 2) The Committee of the Atmosphere and the Biosphere Board on Agriculture and Renewable Resources Commission on Natural Resources: Atmosphere—Biosphere Interaction: Toward a Better Understanding of the Ecological Consequences of Fossil Fuel Combustion, National Academy Press, 1981.
- 3) Bolin, B. Ed.: Report of the Swedish Preparatory Committee for the U.N. conference on Human Environment (Norstedt & Söner, Stockholm, 1971).
- 4) Lee, J. J., Neely, G. E. and Perrigan, S. C.: Sulfuric Acid Rain Effects on Crop Yield and Foliar Injury, PB 80 - 151079, (1980).
- 5) Hindawi, I. J., Rea, J. A. and Griffis, W. L.: Response of Bush Bean Exposed to Acid Mist, Proc. Annual Meeting of the Air Pollution Control Assoc., Vol. 70 th No 3, 77 - 30, 4, 1 - 16 (1977).
- 6) Jacobson, J. S. and Van Leuken, P.: Effects of Acid Precipitation on Vegetation, Proc. Int. Clean Air Congr., Tokyo, 4th, 4, 124 - 127 (1977).
- 7) Wood, T. and Bormann, F. H.: The Effects of An Artificial Acid Mist upon the Growth of *Betula alleghaniensis* Brit, Environ. Pollut., 7, 259 - 268 (1974).
- 8) Wood, T. and Bormann, F. H.: Short-term Effects of a Simulated Acid upon the Growth and Nutrient Relations of *Pinus strobus* L., Water, Air, and Soil Pollut., 7, 479 - 488 (1977).
- 9) Kratky, B. A., Fukuyama, E. T., Hrlin, J. W. and Nakano, R. T.: Volcanic Air Pollution: Deleterious Effects on Tomatoes, J. Environ. Quality, 3, 138 - 140 (1974).
- 10) Harcourt, S. A. and Farrar, J. F.: Some Effects on Simulated Acid on the Growth of Barley and Radish, Environ. Pollut. (Ser. A), 22, 69 - 73 (1980).
- 11) 佐藤治雄: 雨水によるアサガオの脱色, Natural Study, 18, 2 - 6 (1972).
- 12) 木村和義, 則武起夫, 高須謙一: 倉敷における雨水の pH, 電気伝導度およびアサガオ花卉の脱色反応, 農学研究, 60, 39 - 52 (1982).
- 13) 野内勇, 小山功, 大橋毅, 古明地哲人: 人工酸性雨水によるオオムラサキ (ツツジ科) の花卉の脱色について, 東京都公害研究所年報, 13, 89 - 94 (1982).
- 14) Shibata, M. and Yoshitama, K.: Paperchromatographic Determination of Anthocyanin Contained in the Flower of *Pharbitis Nil* Chois. "Scarlet O'Hara", Bot. Mag. Tokyo, 82, 278 - 286 (1969).
- 15) Asen, S., Stewart, R. N. and Norris, K. H.: Anthocyanin and pH involved in the Color of "Heavenly Blue" morning glory, Phytochemistry, 16, 1118 - 1119 (1977).