

ヒートアイランドによる 雑草の高温耐性の進化

千葉大学園芸学部
深野 祐也

1. はじめに

都市の最も顕著な特徴は、アスファルトやコンクリートで地表面が覆われることである。このような不透水性の地表面は、熱を吸収・発生させる効率が高く、ヒートアイランドと呼ばれる都市部の高温化を引き起こす。路傍に生える雑草は、都市の高温ストレスを最も受けている生物のひとつである。夏の晴天時には、時として都市部の地温は50℃を超えることもある。このような都市の高温ストレスは、都市雑草において高温耐性を進化させているかもしれない。近年、私たちの研究グループを含む世界中の研究者が、都市の生物で急速な進化が起きていることを報告している（植調誌第55巻第9

号参照）。しかし「都市の高温」が植物をどう進化させるのかは、これまで報告されていなかった。本稿では、カタバミを対象として、ヒートアイランドに対する適応進化を解明した研究（Fukano *et al.* 2023）を紹介する。

私たちは、カタバミ（*Oxalis corniculata*）という世界中の都市や農地に生えている植物に注目した。カタバミには、葉の色に関して明確な種内変異があり、通常の緑の葉を持つ個体から、真っ赤な葉を持つ個体まで様々である（図-1）。赤い葉の個体はアカカタバミと呼ばれることもある。カタバミの赤葉は、緑から赤に可塑的に変化する樹木の紅葉などと違い、発芽した直後から赤い葉である。つまりカタバミの葉色の違いの多くは遺伝的に決まっている遺伝的変異といえる。都市のカタバミ

はアスファルトやコンクリートの隙間に生えており、高温ストレスを強く受けているように見える。私たちは、都市部では赤いカタバミが多いことに気が付き、これは都市の高温に対する適応進化かもしれないと予想した。そこで、この予測を生態学・植物生理学・遺伝学アプローチで多角的に検証した。

2. 方法と結果

2.1 野外調査

東京都市圏の26地点で野外調査をしたところ、芝生や農地など緑地に比べ都市部では赤い葉のカタバミが多くなるという明確な傾向があった（図-2）。緑葉と赤葉の変化は急激で、たった数十メートルしか離れていない公園



図-1 カタバミの緑葉（左上）と赤葉（左下）
都市の路傍では、赤葉個体が多く目につく。

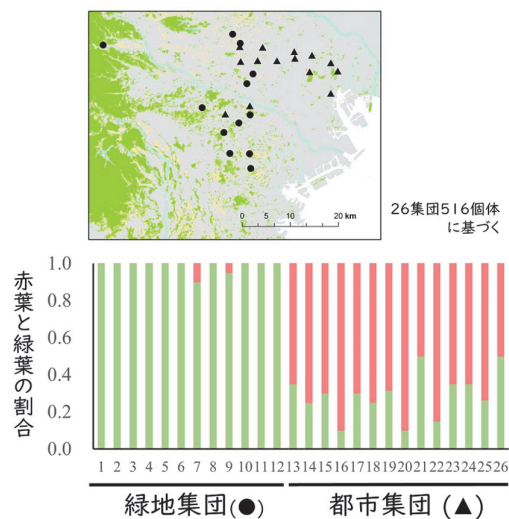


図-2 緑地と都市部でのカタバミの葉色の違い

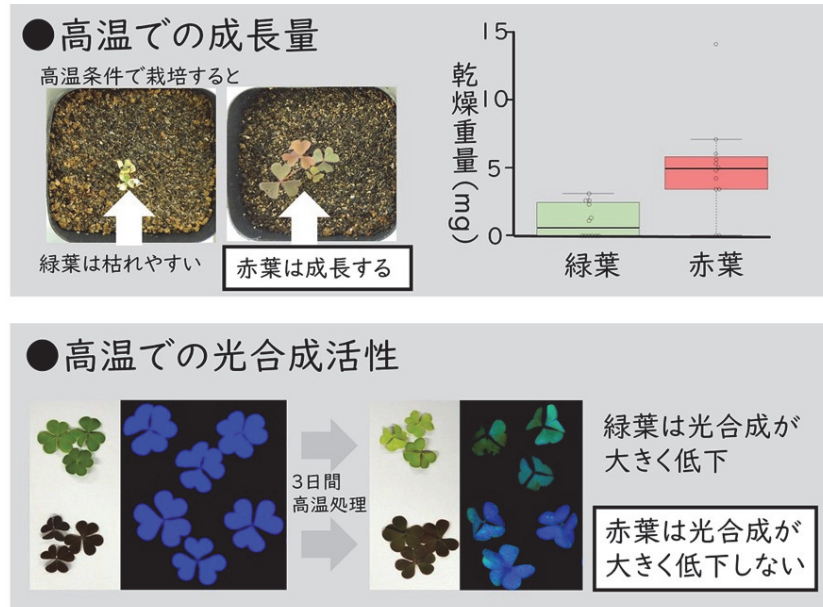


図-3 高温での生長量（上）と光合成活性（下）
高温の栽培環境では、赤葉は緑葉よりも成長量が多く（上）、光合成活性が低下しにくかった。

の芝生と住宅を比べても、葉の色の分布が大きく変化していた。

2.2 光合成能力の測定と栽培実験

次に、都市 - 赤葉、緑地 - 緑葉という野外調査の結果が高温ストレスという選択圧によって生じたのかを、栽培実験と光合成能力の測定によって調査した。もし高温ストレスによって赤い葉が進化したのならば、高温環境では赤葉の方が、光合成能力が高く、成長や種子生産でも有利になるはずである。逆に、通常の栽培環境 (25°C) では、緑葉の方が有利になるはずである。

都市を模したレンガ圃場、温室、人工気象装置での栽培実験や葉の光合成活性の測定など様々な手法でこの予測を検証した。その結果、どの実験でも予測を支持する結果が得られた。つまり、高温下 (35°C) では緑葉よりも赤葉の方が、高い光合成活性を示し成長が良かった一方で (図-3)、通常の気温では赤葉よりも緑葉の方が、高い光合成活性を示し成長が良かった。これは、都市の高温ストレスが、都市で赤葉を進化させたことを強く示唆する結果である。

2.3 集団遺伝学的な解析

都市の赤葉の進化プロセスを集団遺伝学的手法によって推定した。東京都市圏の都市と緑地のカタバミ 136 個体を対象に、ゲノムワイドな SNP の多型を分析することで、集団の進化の歴史を推定した。すると、赤葉は一度だけ進化し東京中に広まったわけではなく、色々な場所で緑葉から赤葉への進化が何度も起こったことが示唆された。

2.4 都市進化の普遍性の検証

もし都市の高温ストレスがカタバミを赤く進化させるなら、東京都市圏以外の、世界中の都市でも同じようなパターンが観察されるはずである。この予測を、世界的な市民観察プラットフォームであり、観察データがオープンに利用できる iNaturalist のデータベースを使って検証した。世界中からアップロードされた 9561 枚のカタバミの写真を分析すると、予測通り都市部のカタバミは赤葉の割合が高かった (図-4)。

3. 考察とまとめ

これらの結果をまとめると、都市の高温ストレスによって、カタバミの葉の色が赤く進化し高温耐性を獲得していることを示している。カタバミの赤葉はアントシアニンが蓄積することで赤くなっている。アントシアニンは、都市のヒートアイランドに適応するため鍵となる重要な二次代謝産物であろう。一般に、高温ストレス条件下で植物が強い光にさらされると、葉緑体を損傷し、光合成効率を低下させる活性酸素が発生する。アントシアニンは、光の減衰と抗酸化物質による保護を通じて、活性酸素によるダメージを軽減するのに役立つと考えられている。カタバミのアントシアニンは表皮に集中しているため、抗酸化物質としての役割よりも、表皮のアントシアニンによって過剰な光を減衰させている役割が大きいと考えられる。つまりカタバミの赤い葉に含まれるアントシアニンは、都市環境における高温ストレス下での過剰な光によって引き起こさ

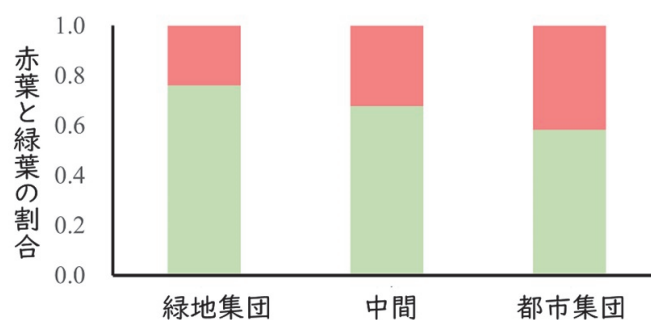
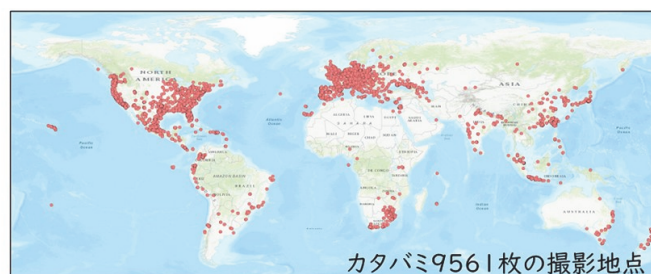


図-4 世界中の市民によるカタバミの撮影地点 (上) と葉色の関係 (下)

れる光阻害を、光減衰によって緩和する働きがあるのだろう。一方、通常の温度条件ではアントシアニンによって十分な光を得られにくくなり、成長が抑制されるという不利さがある。そのため、高温になりにくい緑地では、赤葉ではなく緑葉個体が優占しているのだろう。

都市はヒートアイランドによって周囲より数°C以上気温が高くなっているため、未来の温暖化を先取りしている

とも言える。カタバミの赤葉のように、都市の高温環境で生じている急速な進化を解明することで、温暖化が進んだ世界の生物の動態を予測し、うまく対処することに繋がるかもしれない。

4. 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (21H02559) の支援により実施された。

参考文献

- 深野祐也 2021. 都市と農地における雑草の急速な進化と防除への影響. 植調 55(9), 274-277.
- Fukano, Y., Yamori, W., Misu, H., Sato, M. P., Shirasawa, K., Tachiki, Y., & Uchida, K. 2023. From green to red: Urban heat stress drives leaf color evolution. *Science Advances*, 9(42), eabq3542.