

## 都市化の進化的インパクトはどれくらい大きいのか？

～北海道4都市のシロツメクサで、地域の気候差に匹敵する影響を定量化～

### ポイント

- ・地域的な気候の違いと都市化が、植物の防御形質に関わる遺伝的変異をともに左右することを解明。
- ・都市化の進化的影響が地域的な気候差の影響と比較しても無視できない大きさであることを定量化。
- ・都市が地球温暖化など将来の環境変動に対する生物の進化的応答を予測する場となる可能性を提示。

### 概要

北海道大学大学院地球環境科学研究院の石黒智基研究員（研究当時。現・東京都環境科学研究所研究員）及び内海俊介教授らの研究グループは、北海道4都市に生育するシロツメクサを対象に、都市化\*1が植物の進化に与える影響の大きさを、地域的な気候差の影響と比較して定量化しました。気温、積雪、乾燥などの地域的な気候差は、生物の局所適応を促し、同じ種の中にも地域ごとに異なる特徴をもつ集団を生み出します。一方、近年では都市化も生物進化を引き起こす環境変化として注目されています。都市では舗装面の増加、気温上昇、生物間相互作用の変化などが生じます。しかし、都市化の進化的インパクトが、地域的な気候差と比べてどの程度重要かは分かっていませんでした。

本研究では、函館、札幌、旭川、釧路において、約5,500株のシロツメクサを調査しました。これら4都市の平均気温差は、将来の地球温暖化予測にも相当する規模です。研究グループは、植食者に対する化学防御に関わるシアン化水素（HCN）\*2の生産と、その生産に必要なAc遺伝子クラスター及びLi遺伝子\*3の頻度を調べました。さらに、舗装面など人工的環境の割合、年平均気温、積雪などの都市化に伴う環境変化と、緯度・経度に対応する地域的な気候差の影響を同時に解析しました。その結果、地域的な気候差はシロツメクサの防御形質に関わる進化に大きな影響を及ぼす一方、都市化による環境変化も無視できない影響を持つことが分かりました。特に、HCN生産に必要なAc遺伝子クラスターの頻度に対して、地域的要因である緯度・経度は大きな影響を示しましたが、都市化と強く関連する人工的環境の割合も、それに迫る影響力を持っていました。

本研究は、都市化を、地球温暖化など将来の環境変動を先取りする場として捉え直し、その進化的影響を数値として明らかにした点に意義があります。都市で今起きている進化を理解することで、将来の環境変動に対して生物がどのように応答するのかを予測する手がかりが得られると期待されます。

なお、本研究成果は、2026年6月1日（月）公開のOecologia誌にオンライン掲載されました。



都市化の進化的インパクトは地域の気候差と比べても大きな効果をもつ。写真は、北海道百年記念塔前に繁茂する、本研究の対象であるシロツメクサ（撮影：内海教授）

## 【背景】

気候の違いは、生物の進化を方向づける大きな要因です。気温、積雪、乾燥の程度が異なれば、生物にとって有利な形質も変わります。そのため、同じ種であっても、地域ごとの環境に適応し、異なる特徴をもつ集団が形成されます。

一方で、近年では都市化も、生物の進化を引き起こす環境変化として注目されています。都市では、アスファルトや建物などの人工的環境が増え、気温の上昇、緑地の減少、生息地の分断、被食-捕食や競争といった生物間相互作用の変化が生じます。こうした都市環境が、生物の形質や遺伝的構成を変化させることが明らかになりつつあります。

しかし、都市化が生物の進化を促すことが分かってきた一方で、その影響が地域的な気候差に比べてどれほど大きいのかは分かっていませんでした。地域的な気候差は、長い時間をかけて生物の局所適応を促す強い要因です。これに対し、都市化はより局所的で新しい環境変化です。本研究では、この2つの影響を同じ枠組みで比較し、都市化の進化的インパクトを定量化しました。

## 【研究手法】

研究グループは、都市部から郊外・農村部まで広く生育するシロツメクサを対象に調査を行いました。シロツメクサは、都市化と気候差の影響を比較するうえで適した植物です。調査は、函館、札幌、旭川、釧路の北海道4都市で行いました。これらの都市は気候条件が異なり、平均気温の差は将来の地球温暖化で予測される気温上昇にも相当します。研究グループは、4都市の都市部から郊外・農村部にかけて、合計234集団、5,589個体のシロツメクサを採集しました。

各個体について、植食者に対する化学防御に関わるシアン化水素 (HCN) を生産するかどうかを調べました。あわせて、HCN 生産に必要な2つの遺伝的構成要素である *Ac* 遺伝子クラスター及び *Li* 遺伝子の状態を調べました。*Ac* 遺伝子クラスターは HCN の材料となるシアン配糖体の生成に関わり、*Li* 遺伝子はそれを分解して HCN を生じさせる酵素に関わります。HCN は、植物体が傷つけられた際に生じる化学防御物質で、昆虫、ナメクジ、ネズミなどの植食者に対する防御に関わります。一方で、HCN 生産に関わる遺伝的構成要素は、凍結耐性や乾燥耐性とも関係するため、環境条件によって有利にも不利にもなり得ます。

環境要因としては、都市内部で変化する要因と、都市間で異なる要因を分けて評価しました。都市内部の要因としては、舗装面や建物などの人工的環境の割合、開空度、植生指数、地表面温度、年平均気温などを調べました。都市間の要因としては、地域的な気候差を反映する緯度・経度などを扱いました。さらに、植食圧を正確に評価するため、化学防御物質である HCN を生産しない個体の葉の食害量も測定しました。これらのデータを統合し、空間位置を考慮した構造方程式モデリングを用いて、都市化と地域的な気候差が、HCN 生産及びその関連遺伝子に与える影響を同時に解析しました。

## 【研究成果】

解析の結果、地域的な気候差と都市化の双方が、シロツメクサの防御形質に関わる進化に影響していることが分かりました (図1)。

特に重要だったのは、HCN 生産に必要な *Ac* 遺伝子クラスターの頻度です。*Ac* 遺伝子クラスターの頻度に対する総効果量は、地域的な要因である緯度で  $-0.371$  でした。これに対し、都市化と強く関係する人工的環境の割合の総効果量は  $-0.149$  でした。つまり、地域的な気候差の影響は大きいものの、都市化による影響もその4割を超えており、無視できない大きさであることが示されました。

この結果は、アスファルトや建物で覆われた環境が増えるほど、HCN の材料となるシアン配糖体を

生成できるタイプの *Ac* 遺伝子クラスターが少なくなることを意味します。HCN を生産する個体の頻度についても、地域的な気候差と都市化の双方の影響が検出されました。HCN 頻度は、都市スケール及び地域スケールの両方で、温度が高いほど増加する傾向を示しました。一方で、人工的環境の割合が高い場所では、*Ac* 遺伝子クラスターの頻度が低下し、HCN 生産にも影響していました。

以上から、地域的な気候差はシロツメクサの局所適応を促す主要な要因である一方、都市化もそれに匹敵するほど無視できない進化的インパクトを持つことが明らかになりました (図1)。特に、*Ac* 遺伝子クラスター頻度に対する都市化の影響を数値として示した点は、本研究の重要な成果です。

また、本研究は、都市中心部から郊外への単純な距離勾配だけを見るのではなく、都市景観に含まれる複数の環境要因を統合的に扱うランドスケープ・アプローチを用いました。この方法により、都市環境がモザイク状に入り組む中でも、進化に影響する環境要因を定量的に明らかにすることができました。

### 【今後への期待】

本研究は、都市化を将来の環境変動を先取りする場として捉えることの重要性を示しています。都市では、周辺の郊外・農村部に比べて気温が高くなり、舗装面の増加、緑地の減少、生息地の分断、生物間相互作用の変化などが同時に進みます。これらは、地球温暖化を含む将来の環境変動下で、生物が直面する状況と重なる部分があります。

したがって、都市で今起きている進化を調べることは、将来の環境変動に対して生物がどのように応答するのかを予測する手がかりになります。都市は、人間活動によって変化した場所であると同時に、急速な環境変化に対する生物の応答を観察できる「自然実験の場」として活用できる可能性があります。また、本研究で用いたランドスケープ・アプローチは、シロツメクサだけでなく、都市に生育・生息する多様な植物や動物にも応用できます。今後、様々な都市や生物種で同様の研究を進めることで、都市化と気候変動が生物多様性や生態系に与える影響を、より正確に予測できるようになると期待されます。

### 【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費 JP24H00507、JP24H01501、JP22H05703、及び JSPS 特別研究員奨励費 JP22KJ013202 の助成を受けたものです。

### 【当グループによる都市進化に関するこれまでの研究】

参考1 Santangelo, et al. (2022) Global urban environmental change drives adaptation in white clover. *Science* 375.6586 (2022): 1275-1281.

参考2 Ishiguro, et al. (2024) Urban spatial heterogeneity shapes the evolution of an antiherbivore defense trait and its genes in white clover. *Oikos* 2024: e10210.

## 論文情報

論文名 Urbanization rivals regional climate as an evolutionary driver of white clover (都市化はシロツメクサの進化を駆動する要因として地域的な気候差に匹敵する)  
著者名 石黒智基<sup>1</sup> (研究当時)、内海俊介<sup>1</sup> (<sup>1</sup>北海道大学大学院地球環境科学研究院)  
雑誌名 Oecologia (生態学の専門誌)  
DOI 10.1007/s00442-026-05913-6  
公表日 2026年6月1日(月)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学大学院地球環境科学研究院 教授 内海俊介 (うつみしゅんすけ)  
TEL 011-706-2279 FAX 011-706-4876 メール utsumi@ees.hokudai.ac.jp  
URL <https://evo-comm-ecology.com/>

## 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)  
TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

## 【参考図】

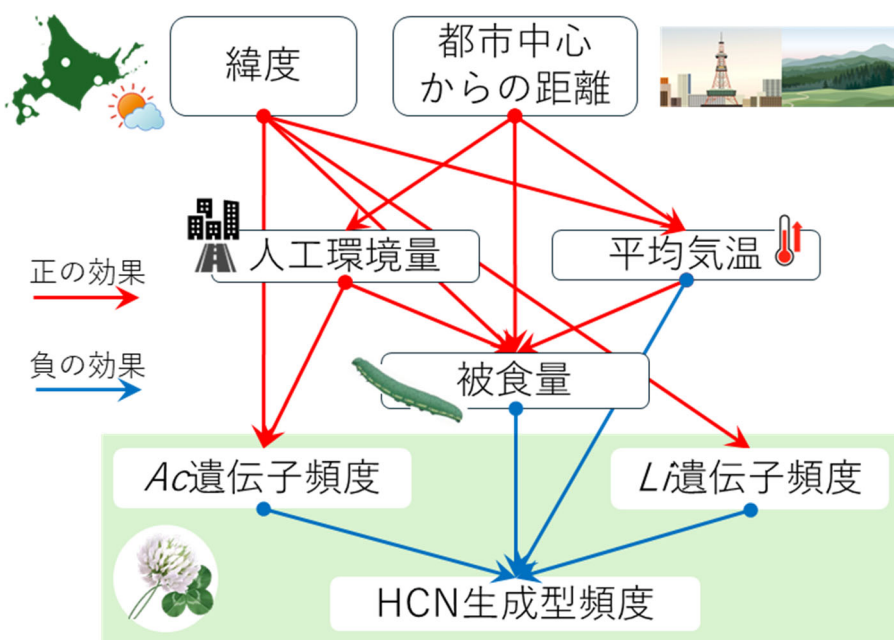


図 1. 地域的な気候差と都市化による環境変化がシロツメクサの進化に影響を与える経路

## 【用語解説】

- \*1 都市化 … 草地や農地などが、住宅地、道路、建物、舗装面などに変わっていくこと。本研究では、舗装面や建物などの人工的環境の割合、気温、植生量、開空度（ビルや樹木などに遮られず、空がどの程度開けて見えるか）などを都市化に伴う環境変化として評価した。また、各調査地点が都市中心部からどの程度離れているかも考慮した。
- \*2 シアン化水素（HCN） … シロツメクサが葉を傷つけられた際に生産する有毒物質。昆虫やナメクジなどの植食者に対する防御として働く。

\*3 *Ac* 遺伝子クラスター及び *Li* 遺伝子 … シロツメクサがシアン化水素 (HCN) を生産するために必要な二つの遺伝的構成要素。*Ac* 遺伝子クラスターは HCN の材料となるシアン配糖体の生成に関わり、*Li* 遺伝子はその材料を分解して HCN を発生させる酵素の生成に関わる。これらの遺伝子には、機能する型と機能しない型があり、機能する型を持つ個体だけが、それぞれの物質を生成できる。本研究では、各地点で機能する型を持つ個体の割合を調べることで、都市化や気候差が防御形質に関わる遺伝的構成にどのような影響を与えるかを評価した。