

## 都市は地球規模で植物の進化を促す

～国際共同研究チームによる検証～

### ポイント

- ・進化学における過去最大規模の国際共同研究によって地球規模の都市進化現象を証明した成果。
- ・都市化が全世界的にシロツメクサの進化に顕著な影響を与えていることを解明。
- ・新発見だけでなく、インクルーシブ（社会的包摂）・サイエンス促進の理念に基づく成果。

### 概要

北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの内海俊介准教授，安東義乃学術研究員が参画する国際共同研究チーム GLUE（Global Urban Evolution Project）は，都市化が地球規模で生物進化に影響を与えていることを明らかにしました。人は地球環境を大きく作り変えています。なかでも，地球上で最も環境改変が進んでいるのは都市です。今回の研究では，地球規模で，気候帯も異なる様々な都市において，平行的に類似した進化が繰り返し起きているのかという問いについて初めて検証しました。5大陸・26 国・160 都市で，都市環境と約 11 万個体のシロツメクサを分析した結果，世界中の都市の環境条件は，近くの郊外よりも地理的に離れた都市間でよく似ており，シロツメクサはしばしば類似したパターンで進化していることが明らかになりました。シアン化水素を生成するシロツメクサの性質は，植食者への防衛や乾燥ストレス耐性に貢献しますが，多くの都市でこの性質が喪失していく進化が起きていました。シロツメクサという身近で世界中に存在する植物から，人々の暮らす都市が生命の進化のありかたを変える決定的な証拠が得られました。

本研究成果は，2022 年 3 月 18 日（木）公開の SCIENCE 誌にオンライン掲載されました。



本研究成果の概要図（イラスト：久野志乃）

## 【背景】

急激な人口増加に伴い、世界中で都市が急速に拡大しています。これらの都市部では、都市開発によって新たな環境が作られ、様々な影響を生態系に及ぼしています。最近では、都市環境の改変が生物進化に影響を与えることも明らかになりつつあります。都市が生物の適応進化にどのような影響を及ぼすのか。この問いを解明することは、病気や害虫に関する対策や、都市計画と人間社会のあり方にも大きな影響を与えます。しかし、都市進化に関する先行研究はまだ少なく、また、研究対象として一つまたはごく少数の都市に焦点を当てており、都市における生物進化について一般的な理解に至っていませんでした。

ここで研究チームは一つの予測をしました。人口が集中し、便利で快適に過ごすことを目的として作られてきた都市は、地球上のあらゆる場所で類似した環境を生み出している可能性が考えられます。もし、人が作り出した都市部の環境条件が世界的に類似しているならば、その自然選択によって、平行的に類似した進化が繰り返し引き起こされているという仮説が考えられます。

この仮説を地球規模で検証するために、世界中に分布するシロツメクサ (*Trifolium repens* L. マメ科) に注目しました。シロツメクサは、シアン化水素 (HCN) を生成する性質を持っています。そして、シロツメクサの集団は、この性質の有無において遺伝的変異をもっています。HCN 生成の有無は、2つの遺伝子によって強力に制御されており、それぞれの遺伝子で顕性型が揃うことにより初めて HCN が生成できるようになります。HCN は植食者に対する防衛に貢献する性質であるとともに、生合成に関わる構成要素は、乾燥ストレス耐性を向上させるという性質ももっています。

したがって、都市部と郊外の間で植食圧や乾燥という環境条件に違いがある場合、HCN 生成という性質の進化が都市化によって引き起こされると予測されます。そして、都市一郊外間での環境条件の違いが地球上の様々な都市で共通してみられる場合、HCN 生成における進化が並行的に生じていると予測されます。

## 【研究手法】

この都市平行進化の予測を検証するために、287 名が参画する GLUE という国際共同研究チームが立ち上げられました (リード: トロント大学マーク・ジョンソン教授ら)。この研究チームには世界中から異なる国籍・性・民族・立場 (シニア研究者だけでなく学生や子どもまで) のメンバーが加わっており、インクルーシブ (社会的包摂)・サイエンスを促進するという理念も併せ持っています。

本チームは、シロツメクサの分布する多様な気候帯の都市において、これまでに類をみない規模で地球全体の調査対象都市を設定し、都市環境とシロツメクサの分析を行いました。これにより、シロツメクサの自生地であるヨーロッパと西アジアから、移入地である南北アメリカ・アフリカ・東アジアまでを広くカバーする 26 か国で、札幌を含む 160 都市の分析が可能になりました。

世界の各都市では、共通プロトコルで研究が行われています。チームメンバーはそれぞれ都市中心部から郊外にかけてトランセクト (調査ライン) を設定し、トランセクトに沿って等間隔に約 40 個のサンプリング地点を設けました。そして、各地点で 20 個体のシロツメクサを採取し、HCN 生成型・非生成型の遺伝子型判別分析も行いました。本データから、HCN 生成型の頻度が都市中心から郊外にかけてどのような変化パターンを持つのか各都市で解析しました。

また、26 都市については全ゲノムリシーケンスを行い、塩基多様度が都市部と郊外部でどのように異なるのか、都市部と郊外部の間でどの程度の遺伝子流動があるのかも解析を行いました。これは、HCN 生成型の頻度の都市一郊外変化が、自然選択によるものではなく偶然によって生じているか、あるいは都市化によって遺伝的な多様性や流動性が低下したことによって間接的に生じているのか、を

検証するために行われました。

## 【研究成果】

解析の結果、都市環境は一貫して不浸透面（アスファルトや建物など人工物被覆率）が多く、郊外より植生が少なく、夏季気温が高いことがわかりました。さらに、都市間で比較した場合、環境条件の違いは、郊外間の違いよりも遥かに小さいものでした。しかしその一方で、積雪や地表面温度、乾燥など必ずしも共通しない要素もあり、このことが平行進化とそのばらつきに影響を及ぼすと考えられます。

では、このような都市環境は、実際にシロツメクサの進化にどのように影響するのでしょうか。160都市を平均すると、都市から郊外へ行くほど HCN 生成型の頻度が増加していく傾向にあることがわかりました（図1）。つまり、都市化が進むほど HCN 生成を行うという性質が失われるということです。その一方で詳しく見ていくと、都市間でもこの頻度の変化パターンには違いがありました。札幌を含めて 62 の都市では都市からの距離と HCN 頻度の間に顕著な正の関係が認められましたが、13 の都市ではその逆の関係が認められ、残りの都市では顕著な関係性が認められませんでした。

このような都市間の違いには、都市一郊外の間での環境条件の異なり具合が関与していることがわかりました。解析結果からは、蒸発散位（乾燥ストレスの指標）における都市一郊外の違いや植生量が最も重要だと示唆されています。都市から郊外にかけて緑が比較的豊かな場合、都市から郊外にかけて HCN 型の頻度が増加していきます。これは緑地に生息する植食者による被食圧が自然選択として働くからだと考えられます。また、都市より郊外のほうが乾燥しているような場合、特に都市から郊外にかけて HCN 型の頻度が増加していきます（札幌もこれに含まれます）。

さらにゲノム分析の結果、都市部と郊外部での遺伝的分化は生じておらず、遺伝的多様性も都市と郊外で違いがありませんでした。したがって、HCN 型頻度における都市一郊外間での顕著な違いは、都市部での遺伝的な断絶や遺伝的多様性の劣化などによってもたらされたり、偶然によってもたらされたりしたものではなく、都市環境による自然選択によって促進されていることが確かめられました。

以上より、都市が地球規模でシロツメクサの進化に対して大きな影響を与えること、そして、都市環境の類似性によって、しばしば平行的に類似した進化が世界中で促進されていることがわかりました。

## 【今後への期待】

本成果は、身近な存在のシロツメクサから得られた限定的な知見にとどまるわけではありません。シロツメクサは、人々の暮らす都市が生命の進化にどのような影響を与えるのか、この大きな問いに答えるモデルです。そして今回、都市というものが生命の進化のあり方を変えるという決定的な証拠が得られました。

本研究によって、地球全体にあまねく存在する都市の形成を通して、確かに人間が進化を決定づけるということがわかりました。この知見は、これからの都市設計において、様々な生物のより良い保全戦略を組み立てたり、感染症に対する防疫戦略を組み立てたりするための重要なスタート地点になると考えます。そのために、GLUE チームはさらなるプロジェクトを開始しています。今回の共同研究を通して、ゲノムから表現型そして環境までの地球希望の膨大なデータを集積させることができました。これらを活用し、都市における進化やその人間社会との関わりに関する多様な課題に対する成果が期待されます。そして、GLUE チームのインクルーシブ・サイエンスとしての理念もこれからの研究に対する重要な基盤となるはずです。

## 論文情報

論文名 Global urban environmental change drives adaptation in white clover (都市化は地球規模でシロツメクサの適応進化を促進する)  
著者名 Santangelo, J.<sup>1</sup>, Ando, Y.<sup>2</sup>, Utsumi, S.<sup>2</sup>, *et al.* (<sup>1</sup>トロント大学, <sup>2</sup>北海道大学北方生物圏フィールド科学センター)  
雑誌名 SCIENCE  
DOI 10.1126/science.abk0989  
公表日 2022年3月18日(金)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 准教授 内海俊介(うつみしゅんすけ)  
TEL 0165-38-2125 FAX 0165-38-2410 メール utsumi@fsc.hokudai.ac.jp  
URL <https://evo-comm-ecology.com/>

## 配信元

北海道大学総務企画部広報課(〒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】

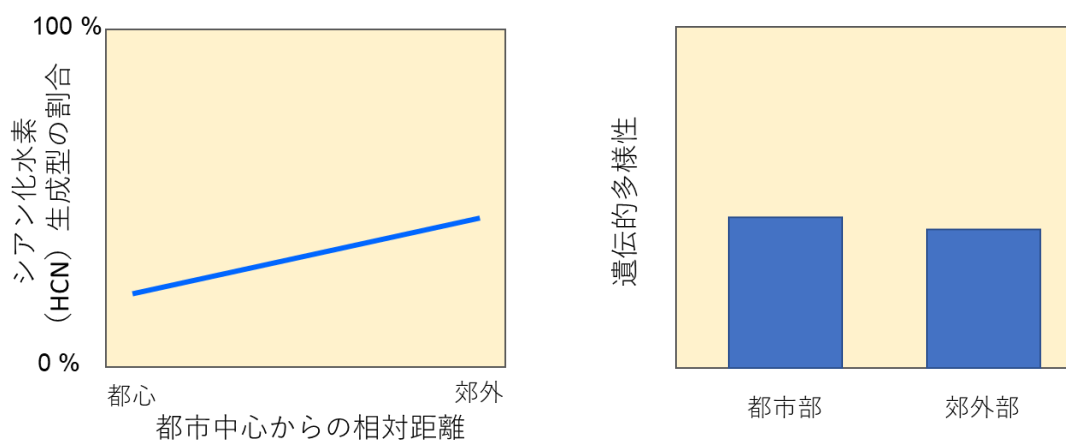


図 1. シアン化水素 (HCN) 生成型のシロツメクサの割合。都市から郊外にいくほど平均して増加 (左)。遺伝的多様性は都市部と郊外部で違いはみられない (右)。