



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Spatial perspectives of urbanization-induced plant evolution [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	石黒, 智基
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第16219号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95267
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	ISHIGURO_Tomoki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士 (環境科学)

氏 名 石黒 智基

学 位 論 文 題 名

Spatial perspectives of urbanization-induced plant evolution

(都市化が駆動する植物の進化に関する空間的観点に基づいた研究)

人新世とも呼ばれる現代において、都市化にともなう劇的な環境変化は、生物多様性のみならず生物の進化にも大きな影響を及ぼす。近年、こうした都市化が駆動する進化についての知見が急速に蓄積されてきている。しかし、都市環境の進化的影響の実態については、まだ多くのことが明らかにされていない。これは、都市進化の研究のほとんどが二分的な比較（都市 vs 郊外）やトランセクト調査による研究アプローチ（以下、従来アプローチ）が主流であり、それゆえ大きく以下の3つの点が解明されていないからである。（1）多くの環境要素が都市勾配に沿って変化する一方で、その変動様式は非線形的・不連続的である。したがって、従来アプローチでは都市化にともなうどの因子が形質進化を駆動しているのか明らかにすることができていない。（2）都市—郊外における集団の形質の状態や遺伝子頻度には、ミクロな要因（都市環境の構成要素）だけでなく、マクロな要因（気候の違いなど）が影響しているはずである。しかし、従来アプローチは都市—郊外間でのパターンにもっぱら着目しており、ミクロ要因とマクロ要因の両方を考慮したメカニスティックな理解は進んでいない。そのため、異なる都市にまたがって共通する都市進化のメカニズムに関する深い理解ができていない。（3）従来アプローチによって都市—郊外での形質トレンドは明らかになるが、都市環境と郊外環境で自然選択が実際にどのように異なるのかを検証できていない。加えて、迅速な進化の源となる遺伝的変異が維持されてきたメカニズムも明らかにできていない。

これらの問題を乗り越えるためには、空間的な観点を重視した以下のアプローチが有効であると考えられる：1）従来アプローチにとらわれない、都市—郊外空間における進化の実態についての包括的な理解を目指す景観アプローチ、2）複数の都市を対象にした景観アプローチの拡張と、ミクロ要因とマクロ要因を同時に考慮したモデリング、3）空間的な反復を設定した上で実際の都市環境と郊外環境という異なる地点で同時に行う交互移植実験による自然選択の実証。

本研究では、世界中の都市から郊外にかけて生育するシロツメクサに着目して、これらの空間的な観点から、都市において生物がどのように進化し、適応していくのかを明らかにすることを目的とした。シロツメクサは、被食防衛に寄与するシアン（HCN）産生能と、その有無を決める構成因子（シアン配糖体と加水分解酵素）を持ち、遺伝的基盤が明らかである。したがって、都市における進化の野外実証に適している。

第1章では、植物がどのように進化し、不均質な都市環境に適応していくのかを明らかにするために景観アプローチを採用し、札幌および周辺の122集団から3299株のシロツメクサを収集した。そ

して、HCN（およびその構成因子）を産生するシロツメクサと、食害、開空度、人工地表面率、積雪深、気温などといった環境要因の空間的変動との関係を調査した。都市景観の不均質性は、環境要因の複雑な空間変動をもたらした。その中でも、食害、開空度、人工地表面率は、集団におけるシアン産生能の頻度に強く影響した。特に、人工地表面率はシアン配糖体生成遺伝子を持つシロツメクサ頻度と関連していたが、食害は関連していなかった。その結果、シアン配糖体生成遺伝子を持つシロツメクサ頻度は、都市中心部ほど低く郊外部ほど高くなるという、極めて明瞭な勾配が観察された。一方、シアン産生能の空間構造はモザイク状になっており、シアン配糖体生成遺伝子とHCN産生能の空間構造は一致しないことが明らかになった。これらの結果から、シアン配糖体の多機能性と都市景観の不均質性が、進化的形質のモザイク状空間構造を決定していると考えられる。

第2章では、異なる都市における都市進化メカニズムの共通性に関する理解を深めるため、第1章で行った景観アプローチを気候の異なる複数都市に拡張した。したがって、札幌の集団に加えて函館市4集団、旭川市41集団、釧路市31集団の合計234集団5589株のシロツメクサを解析した。HCN（およびその構成因子）を産生するシロツメクサの頻度に対する、食害、開空度、人工地表面率、積雪深、気温などの都市部から郊外部にかけてのミクロ要因の空間的変動、および緯度・経度というマクロ要因の影響を調べた。その結果、都市化にともなう環境変動である人工地表面率と気温からシアン配糖体生成遺伝子とHCN産性能への一貫した影響が検出された。このことは、複数の都市にわたって都市化による特徴的かつ共通した環境変化があり、それが平行的に都市進化を駆動していることを示唆する。さらに、緯度・経度というマクロスケールな環境の違いも、HCN産性能とその構成因子の集団内頻度に影響を与えることが分かった。そして、その効果量は都市化にともなう環境変動よりもやや大きかった。これらの結果から、緯度・経度というマクロスケールな環境の影響があったうえで、相加的に都市化にともなう環境変動の影響が足し合わされ、進化を駆動すると考えられる。

第3章では、都市部と郊外部において自然選択のパターンそのものが変化している可能性を検証するため、都市環境と郊外環境における大規模な相互移植実験を実施した。それぞれの環境条件について空間的な反復も設定した。特にこの時、シアン産性能に対する頻度依存選択に着目し、各個体の周囲のシアン産性能を持つ個体の頻度をランダムに操作した上で適応度指標（生残率とバイオマス）への影響を調べた。その結果、食害圧が高い郊外部環境においては負の頻度依存選択が働いているが、食害圧が低い都市部環境においては正の頻度依存選択になっており、自然選択の様式そのものが変化していることが分かった。つまり、郊外環境では平衡選択（負の頻度依存選択）によって遺伝的多型が維持され、シアン産生能は高い頻度で保たれる。しかし、都市化によってこの平衡選択が崩壊し、多型が喪失して一方向の進化に向かってしまうこと、特にシアン産生能が失われる方向へ進化しやすいことが示唆された。

本研究により、地域的な大きなスケールでの環境と、都市から郊外にかけた不均質な環境変動が相加的に都市進化を駆動することが明らかになった。さらに、都市部と郊外部の局所的な環境の違いによってそもそもの自然選択の様式が変化することが明らかになった。以上の結果は、都市化が駆動する進化のメカニズムとその共通性に関する、これまでに解明されていなかった新たな知見を与えるものである。