都市およびその近郊地域におけるソメイヨシノの開花日と周辺土地被覆の関係

Relationship between Flowering of *Prunus x yedoensis* and Surrounding Land Cover in Urban and Suburban Areas

多田 裕樹* 村上 暁信**

Yuki TADA Akinobu MURAKAMI

Abstract: Changing environment with urbanization affects not only human but also plants and animals living in the urban area. The changing of phenology is one of the effects of them and it is said that there is a possibility that change of urban ecosystem are driven by the phenological shift. This study investigated relationship between flowering timing of *Prunus x yedoensis* and the surrounding land cover to reveal the influence of urbanization on tree phenology. As a result, there was 8 days difference of flowering date at a maximum and the trees flowered earlier tended to appear near the center of urban area. The influence of surrounding land cover on phenology was confirmed, but the each land cover had different tendencies. Proportion of paved and bare area showed consistent correlation with flowering date, but built and green covered area didn't necessarily show a certain relationship to flowering date. And it was suggested that the most influential range of land cover in flowering was about 50m from the trees. Besides, it was supposed that not just surrounding land cover but also macro environmental gradient and local environment influence on the difference of flowering timing.

Keywords: tree phenology, urbanization, land cover, airborne remote sensing, *Prunus x yedoensis*

キーワード: 生物季節, 都市化, 土地被覆, 航空機リモートセンシング, ソメイヨシノ

1. はじめに

生物季節とは、生物が季節の推移に応じて示す生活の種々相のことであり¹⁾、植物においては開花、紅葉、落葉などがこれに当たる。地球温暖化が顕著にみられるようになってきた昨今、気温の上昇は多くの生物に影響を及ぼし、分布域の北上や生長期間の拡張、開花の早期化などの生物季節の変化が生じている²⁾。

地球規模での生物季節の変化が懸念される一方で、都市環境の改変による生物季節の変化も生じている。都市においては、ヒートアイランド現象や大気汚染が発生している。都市における気温の変化は全球規模よりも顕著と言え、生物季節にも大きな変化が生じる可能性がある。都市化の進展に伴う生物季節の変化がもたらす生態学的影響として、種内や種間の相互作用の変質があり、それらに伴う植物群集の動態の変化の可能性などが指摘されている³⁾。都市域における生物多様性の重要性が共通認識となっている近年、生態系の変質をもたらす得る要因の一つである生物季節に関してさらなる研究の蓄積が求められている。

都市空間における樹木の生物季節を調査した既往研究からは、都市部と郊外部では生物季節に差が見られること^{4), 5)}、そのような都市部と郊外部の生物季節差が気温の勾配と対応していること^{6), 7)}が報告されており、ヒートアイランド現象を始めとする人為的影響によって生物季節が変化していることは明らかである。しかし、都市化の程度は中心部から郊外部に向けて単純な勾配があるのではなく、複雑な土地被覆・土地利用によって多様な環境が形成されている。周辺環境と生物季節の関係については既往研究においても、都市内のクールスポット付近ではソメイヨシノの開花が遅いこと⁸⁾、樹木の周囲に建物がある場合は郊外でも開花日が早く、川沿いでは遅くなること⁹⁾などが指摘されているが、都市化の程度や周辺環境という観点から生物季節への影響を定量的に研究した事例は少ない。

そこで本研究は、都市およびその近郊地域における生物季節の空間的差異をソメイヨシノの開花調査から明らかにし、都市化の

程度との関連性を考察することを目的とした。本研究において都市化の程度は土地被覆を用いて評価する。土地被覆は自然環境と都市環境の大きな違いの一つであるため都市化の程度を表す指標となり、人による生物への影響という観点からの評価が可能であると考えられる。

2. 対象地

本研究の対象地は茨城県つくば市および土浦市とした(図-1, 表-1)。両市は茨城県県南地域において最も人口の多い自治体であり、業務核都市にも位置付けられている。市街地中心部では住宅地や商業施設が密集する一方で公園など緑地も点在する。さらに、中心部から離れると農地や樹林地も広がることから、多様な環境における生物季節と土地被覆の関係の比較が可能であるため、対象地として選定した(図-2)。

3. 方法

(1) 生物季節観測

本研究で対象とする樹木の生物季節現象はソメイヨシノ(*Prunus x yedoensis*)の開花とした。ソメイヨシノは対象地内の街路、学校、公園などに広く植栽されており、多数の個体が存在している。さらに本研究では、都市化による影響の差を空間的

図-1 研究対象地と航空機観測範囲

*筑波大学大学院生命環境科学研究科

**筑波大学大学院システム情報工学研究科

表-1 対象地概要

	つくば市	土浦市
人口(人) ^{※1}	214,345	144,326
面積(km ²)	284.07	122.99
人口密度(人/km ²) ^{※1}	755	1,170
年平均気温(°C) ^{※2}	14.2	14.8
年間降水量(mm) ^{※2}	1326	1234

※1: 人口および人口密度の値は2010年6月1日時点

※2: 平均気温と年間降水量はつくば(館野)および土浦気象観測所の2000年～2009年の観測値の平均値

図-2 対象地の航空機リモートセンシング可視画像と現地撮影写真

に把握するため、樹木の状態は均質であるほうが望ましい。その点、ソメイヨシノは遺伝的にはほぼ同一と言われており¹⁰⁾、既往研究や気象庁の生物季節観測の結果からも開花日と気温の相関が高いことが報告されている^{11), 12)} ため、対象樹種として選定した。

調査範囲は、土浦駅と研究学園駅間に存在する都市的環境から里山・農地など自然環境までの環境傾度を取るように、東西方向にベルト状に設定した(東西約13km×南北約0.8km)。対象範囲内の標高は1～36mである。観測は対象範囲内の68地点、各地点1-3個体、合計168個体に対して、2010年3月22日より毎日行った。開花の基準は対象木1本につき10輪以上の花が開いた日とし、目視により判定した。さらに、各調査地点においていずれかの個体が開花した日をその地点の開花開始日、各調査地点ですべての個体が開花を完了した日をその地点の開花完了日とした。

(2) 航空機リモートセンシングデータを用いた土地被覆解析

広範囲の環境を把握する手法として、リモートセンシング(以下RS)が有効である。本研究のRS観測には航空機搭載MSS-AZMを用い、2009年12月22日の昼間に可視域から赤外域までの12バンドのデータを取得した。観測時期は落葉樹の落葉期間に当たるが、ソメイヨシノの開花には晩秋から春季までの気温が影響するため、落葉期の観測データから周辺環境を評価することとした。観測高度は海拔450m、空間分解能は0.5mである。RS観測範囲は(1)の観測地点をほぼ含むよう設定した。得られたRS画像は茨城県数値地図を参照し、アフィン変換による幾何補正を行った。

土地被覆分類は航空機観測により取得した可視域2バンド(中心波長565nm, 667nm)、近赤外域1バンド(中心波長848nm)、熱赤外域1バンド(中心波長9245nm)のデータをもとに教師なし分類によって120クラスに分類した後に、最終的に建築物、人工舗装面、水面、緑被地、裸地の5つに再分類した。

(3) 調査地点の周辺土地被覆の評価

(2)により得られた土地被覆分類結果を用い、各調査地点の周辺土地被覆の割合を求めた。近傍の土地被覆の影響から広域的な土地被覆の影響までを考慮する為に、分析範囲は調査地点から半径10m, 50m, 100m, 200mと複数設定した。

4. 結果

(1) ソメイヨシノの開花日

個体別の開花日を図-3に、調査地点別の開花開始日および開花完了日を図-4に示す。最も早い開花(10輪以上が開花)は3月26日に5個体で見られた。全体の80%の個体は4月1日と4月2日に開花し、4月3日には全ての個体が開花に達した(図-3)。4月1日と2日に開花日を迎えた個体が集中したが、これは3月下旬に平年の3月下旬の平均気温(8.5°C/土浦気象観測所)を下回る日が続き、4月1, 2日の急激に上昇した気温の傾向と対応していた(図-3)。

調査地点毎では、4月1日と2日に最初の開花が見られたのは48地点で(68%)、55地点(81%)が4月1日と2日に開花を完了した(図-4)。つくば駅と土浦駅をそれぞれの市街地の中心とみなし、各調査地点と両駅の距離から、各調査地点をつくばと

土浦に分類した(図-5)。つくばと土浦を比較すると、土浦では調査地点間の開花日のばらつきが小さく、最も早い開花開始日と開花完了日はそれぞれ3月28日と3月31日であった。3月31日までに開花を完了した地点数も、つくばの8地点に対し、土浦では土浦駅前の1地点のみであるなど、全体につくばで開花が早く進行した。

各観測地点の開花開始日および開花完了日のデータをもとに、逆距離加重法(IDW法)を用いて内挿補間を行い、開花日の分布図を作成したところ、土浦駅周辺、つくば駅周辺で開花が早く、穴塚近辺で開花が遅くなっている傾向が明確に表れた(図-5)。

(2) 土地被覆解析結果

建築物や人工舗装面は土浦駅、つくば駅、研究学園駅の駅周辺で多く、緑被地や裸地は里山林の優占する穴塚周辺や農的土地利用が広がる郊外部に多く分布していた(図-6)。なお、本研究のRS観測が行われたのは冬季であり、落葉樹の落葉期にあたるため、緑被地に分類された土地は常緑樹および草本種の広がる土地となる。また、裸地として分類された土地の多くは農地であるが、開発の進むつくば駅以西の地域については、宅地用の造成地が含まれた。つくば駅周辺と土浦駅周辺の土地被覆を比較すると、土浦駅周辺では建築物と人工舗装面が土地被覆の大半を占め、つくば駅周辺では土浦駅周辺に比べ緑被地の割合が大きかった。

(3) ソメイヨシノの開花日と周辺土地被覆の関係

本研究の土地被覆解析は航空機RSデータをもとに行っているため、航空機RSデータの観測範囲の辺縁部に位置する開花日調査地点は解析から除外した。各半径の円のうち、95%以上がRS観測範囲に含まれている調査地点のみを抽出したところ、半径10m, 50m, 100m, 200mではそれぞれ64, 62, 57, 47地点が抽出された。

抽出された調査地点に対して、それぞれの半径の円内の各土地

図-3 ソメイヨシノの開花個体数と日平均気温

※日平均気温は土浦の気象観測所の観測値を使用¹³⁾

図-4 調査地点別の開花開始日と開花完了日

※研究学園駅に近い2調査地点は本図からは除いた

図-5 ソメイヨシノの開花開始日（上）と開花完了日（下）の空間的差異

※図中の点はソメイヨシノ開花日観測地点を表す

図-6 土地被覆分類図

被覆割合を算出した。半径 100m の土地被覆解析において、人工的な土地被覆である建築物と人工舗装面の各割合の和が最も大きいのは土浦駅前の調査地点で、値は 85%であった。逆に最も割合が小さいのは霞ヶ浦に繋がる桜川の堤防沿いの中で最も市街地中心から離れている調査地点の 19%であった。同様に、つくばで建築物と人工舗装面の割合の和を算出したところ、最大値と最小値はそれぞれ 56%と 17%となり、土浦に比べて調査地点周辺の人工的な土地被覆の割合が小さく、調査地点間の差も小さかった。水面は土浦だけで見られた土地被覆であり、霞ヶ浦湖岸や桜川沿いの調査地点周辺に 10~48%存在した。

図-7 は各調査地点を開花日の早晩により 3 群に分類し、各群に含まれる調査地点の各半径における周辺土地被覆の平均値を示したもので、表-2 は開花日と各土地被覆割合の相関係数 (Spearman の順位相関係数) を示したものである。

1) つくば

開花日と各土地被覆の関係を見ると、5~10%と僅かではあるが、開花日の早い調査地点周辺の人工的な土地被覆割合 (半径 100m, 200m) の平均値が、開花の遅かった地点に比べて高い傾向が見られた (図-7)。

Spearman の順位相関係数による分析では、人工舗装面 (半径 100m, 200m) の割合が大きいほど開花が早まり、裸地 (半径 50m, 100m) の割合が大きいほど開花が遅くなる傾向があった (表-2)。建築物の割合と開花日には関係性は見られなかった。緑被地は半径 50m の解析においてのみ開花を早める傾向が見られた。半径 10m の解析においては、いずれの土地被覆とも有意な相関関係は見られなかった。

2) 土浦

土浦では、建築物 (半径 10m) や人工舗装面 (半径 50m, 100m) の割合と開花日には負の相関関係が、緑被地 (半径 50m, 200m) や裸地 (半径 50m, 100m) の割合と開花日には正の相関関係が見られた (表-2)。また、土浦にのみ見られた土地

被覆である水面は、半径 50m の解析において開花日と有意な正の相関関係があった。しかし、2 日に開花完了した群と 3 日に開花完了した群の土地被覆を比較すると、裸地、緑被地、水面割合の和 (半径 200m) はともに 55~60%程度であるものの、水面の割合は 2 日に開花した群のほうが大きかった (図-7)。

5. 考察

(1) ソメイヨシノの開花

開花日には最大で 8 日間の差が見られた。個体間差があることは確かであるが、この差は 2010 年の各気象観測所のソメイヨシノの開花日の観測結果¹³⁾と比較すると、水戸と津の 9 日間、水戸と鳥取の 8 日間などと近い値である。このように市街地とその周辺地域に存在する開花日の差は、地理的に遠く離れた環境で生じる差にも匹敵し得るものである。今後、都市化による生物季節の変化は、都市生態系における種間相互作用や種内遺伝子流動などを考える際に、考慮すべき現象であると言える。

また、市街地から離れた郊外部で開花が遅い一方、土浦とつくばの市街地では開花日にばらつきがあり、早い開花は都市部でのみ見られたことから (図-5)、都市化に伴い、樹木の生物季節に

□ 建築物 □ 人工舗装面 ■ 裸地 ■ 緑被地 ■ 水面

図-7 各調査地点周辺の土地被覆割合と開花日の関係

※各グラフの縦軸は各土地被覆の割合を、横軸は開花日を表す

※図中「-3月31日」は3月26日~31日に開花した群を、「-4月1日」は3月26日~4月1日に開花した群を表す

表-2 土地被覆と開花日の相関 (Spearman の順位相関)

解析半径	10m				50m			
	つくば (n=30)	土浦 (n=32)	つくば (n=29)	土浦 (n=31)	つくば (n=29)	土浦 (n=31)	つくば (n=29)	土浦 (n=31)
建築物	0.137	0.131	-0.507 **	-0.436 *	0.010	0.091	-0.276	-0.349
人工舗装面	-0.075	-0.291	-0.053	-0.105	-0.289	-0.193	-0.338	-0.493 **
裸地	0.126	0.297	0.192	0.097	0.279	0.502 **	0.445 *	0.404 *
緑被地	-0.078	-0.058	0.103	0.259	-0.239	-0.359 *	0.214	0.374 *
水面	-	-	-	-	-	-	-0.117	0.400 *

解析半径	100m				200m			
	つくば (n=25)	土浦 (n=30)	つくば (n=23)	土浦 (n=23)	つくば (n=23)	土浦 (n=23)	つくば (n=23)	土浦 (n=23)
建築物	-0.080	0.223	-0.088	-0.307	-0.211	-0.076	-0.127	-0.322
人工舗装面	-0.408 *	-0.121	-0.191	-0.428 *	-0.439 *	-0.155	-0.132	-0.379
裸地	0.408 *	0.354	0.398 *	0.256	0.204	0.143	0.365	0.210
緑被地	0.059	-0.237	0.283	0.279	0.226	0.018	0.321	0.420 *
水面	-	-	-0.129	0.342	-	-	0.012	0.347

** : 1%水準で有意, * : 5%水準で有意

※正の相関係数は開花日を遅める方向に、負の相関係数は開花日を早める方向に作用する傾向があることを示す

※研究学園駅に近い2調査地点は本解析からは除く

変化が生じていることが確認された。

(2) ソメイヨシノの開花日と周辺土地被覆の関係

市街地で開花の早い地点が現れたものの、人工的な土地被覆である建築物と人工舗装面を比べると、周辺に人工舗装面の割合の大きい環境は開花が早い傾向があった一方、建築物については同様の傾向は見られなかった(表-2)。この理由として、建築物と樹木の位置関係によっては日射量の減少や、風の遮蔽効果などに差が生じることや、土地被覆による解析では延床面積や用途の違いが反映されないことなどが考えられた。

裸地、緑被地、水面といった非人工的な土地被覆についても、開花日との関係にはそれぞれ特徴が見られた。つくばと土浦ともに、裸地割合が大きい環境では開花日が遅くなる傾向が見られた(表-2; 半径 50m, 100m)。一方、緑被地については、つくばでは開花日との間に一定の関係はなく、半径 50m の解析においては開花を早める傾向が見られた。緑被地はその分類の中において、常緑樹や草地在同等に扱われ、樹冠下の被覆の違いも反映されない。このように同じ緑被地に分類された土地の中にも質的に異なる環境が含まれることが、緑被地と開花日の間に明確な関係性が現れなかった一因であると考えられる。水面に関して、土浦において、2 日に開花した群と 3 日に開花した群を比較すると、裸地、緑被地、水面の割合の和は同等であるものの、水面の割合は 2 日に開花した群のほうが大きかった。一般的に、海辺や川辺など大規模な水域に近い地域では、最低気温と最高気温の差が小さくなることが知られており、この水域の気候緩和効果が裸地や緑被地とは異なる影響を開花に及ぼしていることが示唆された。

開花に影響を及ぼす周辺環境の範囲については、半径 50m の解析において、土地被覆と開花日の間に多くの有意な相関関係が見られたことから、市街地およびその近郊地域におけるソメイヨシノの開花日の差は同範囲程度の環境の違いによる影響が大きいことが考えられる。

(3) 周辺土地被覆以外の要因による開花日の差

つくばと土浦を比較すると、建築物や人工舗装面は土浦で密に分布している(図-6)のに対し、開花はつくばで早い傾向(図-5)が見られた。このような結果が得られた要因として、よりマクロなスケールでの環境差の影響の存在が考えられる。

土浦の調査地点の多くは霞ヶ浦の気候緩和効果により県内でも最低気温が比較的高い地域に位置し、つくばの調査地点の多くは県内でも特に冬季の最低気温が低くなりやすい地域に位置する¹⁴⁾ 春季の生物季節については、気温の高い地点で早く進行することが知られており、4 樹種の展葉や開花の進行過程を調査した原田ら¹⁵⁾ も、臨海部に比べて内陸部で生物季節の進行が遅いことを報告している。しかしながら、本研究の結果は水域に近い土浦で開花が遅く、内陸部のつくばで開花が早い傾向を示した。ソメイヨシノの開花は、晩秋から冬季の低温にさらされることで休眠が打破され、その後の平均気温の積算により開花の早晚が決定される¹²⁾。暖冬であった 2005 年は全国的に開花が遅くなった¹⁶⁾ ように、水域に近い土浦はつくばに比べて最低気温が高く保たれ、休眠打破が遅れた可能性が考えられる。本研究では、周辺環境として各調査地点から半径 200m 内の土地被覆のみを解析したが、土浦とつくばの生物季節の比較においては、より広域的な環境の違いが開花日の差をもたらしている可能性が考えられる。

さらに、広域的な影響による開花日の差が見られた一方で、同調査地点内にも開花日に数日の差が見られた。これは一部には樹木の個体間差によるものと考えられる。しかし、土浦で他個体が 3 月 31 日以降に開花する中、唯一 3 月 28 日に開花した個体の近傍にはポンプ場の熱の排出口が確認された。このように、個体の植栽位置によっては局所的な周辺環境による影響を受け、特に開花開始日の早晚に関係すると考えられ、土浦で半径 10m 内の建

築物の割合と開花日の間に相関関係が見られたことも、建築物の隣接に伴う局所的な影響の存在を反映した可能性が考えられる。

6. 結論

本研究は都市化の影響による生物季節の変化を明らかにするため、都市的環境から農的・自然的環境まで比較可能である郊外都市において、ソメイヨシノの開花日と周辺土地被覆の関係を調査した。その結果、市街地では郊外部に比べて開花日のばらつきが大きく、開花日の早い地点が現れ得ることがわかった。つくばと土浦、それぞれの都市内における開花日と土地被覆の関係性の分析結果からは、5 つに分類した土地被覆はそれぞれに開花への影響に差異が見られることが確認された。人工舗装面の多い環境では開花が早くなり、裸地の多い環境では開花が遅くなる傾向がある一方、建築物や緑被地と開花日には必ずしも一定の関係が見られなかった。緑被地や建築物は同分類内にもそれぞれ、木本と草本や高木と低木の違い、延床面積や用途の違いが内包されていることから、一定の傾向が表れにくかったものと考えられる。これらのことから、人工物の増加が単純に開花時期の変化をもたらすのではなく、周辺環境の性質によって開花日への影響は異なることが考えられる。また、樹木から半径 50m 程の範囲内の土地被覆の違いが、市街地とその近郊地域の開花日の差に最も影響している可能性が考えられた。さらに、地域間の開花日と土地被覆の関係性の比較からは、地域間に生じた開花日の差は、沿岸部か内陸部かといった、より広域的な環境の違いが反映されていることが推察された。今後は、建築物や緑被地に分類された土地の中にも含まれる差異、各土地被覆と樹木の位置関係を踏まえることで、より詳細な土地被覆と開花の関係が議論できるものと考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(若手研究(A) 課題番号 21688001)により実施したものである。記して関係各位に謝意を表する。

引用文献

- 1) 河野昭一・井村治(1999): 環境変動と生物集団: 海遊舎, 280pp
- 2) Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J.-M. Fromentin, O. H.-Guldberg, F. Bairlein (2002): Ecological responses to recent climate change: Nature 416, 389-395
- 3) Neil, K. and J. Wu (2006): Effects of urbanization on plant flowering phenology: A review: Urban Ecosystem 9, 243-257
- 4) Roetzer, T., M. Wittenzeller, H. Haeckel, J. Nekovar (2000): Phenology in central Europe - differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas: Int J Biometeorol 44, 60-66
- 5) White, M. A., R. R. Nemani, P. E. Thornton, S. W. Running (2002): Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest: Ecosystems 5, 260-277
- 6) 松本太・三上岳彦・福岡義隆(2006): ソメイヨシノの開花に及ぼすヒートアイランドの影響-東京都区部を例として-: 地理学評論 79, 322-334
- 7) Mimet, A., V. Pellissier, H. Quenol, R. Aguejidad, V. Dubreuil, F. Roze (2009): Urbanization induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*: Int J Biometeorol 53, 287-298
- 8) 宮崎ひろ志・土川忠浩(2007): 兵庫県におけるソメイヨシノの開花日分布調査-市民参加による都市環境調査イベントの試み-: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 693-694
- 9) 松本太・福岡義隆(2003): 植物季節に及ぼす都市の温暖化の影響-熊谷市におけるソメイヨシノの開花日を指標として-: 地理学評論 76 (1), 1-18
- 10) Innan, H., R. Terauchi, N. T. Miyashita, K. Tsunewaki (1995): DNA fingerprinting study on the intraspecific variation and the origin of *Prunus yedoensis* (Soyeyoshino): Jpn. J. Genet. 70, 185-196
- 11) 青野靖之・小元敬夫(1990): 温度変換日数法を用いたサクラの開花日の簡便推定法: 農業気象 46, 147-151
- 12) 気象庁(1996): 新しいサクラの開花予想: 気象庁解説資料 24
- 13) 気象庁: 気象統計情報: <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 14) 国際科学技術博覧会協会・国際科学振興振団(1981): 地域特性調査-常総地域における地域特性把握: 138pp
- 15) 原田星一郎・井本郁子・米瀬泰隆・武内和彦(1997): 生物季節を指標とした土地環境把握に関する研究: ランドスケープ研究 60 (5), 511-514
- 16) 気象庁(2005): 生物季節現象の変化: 異常気象レポート 2005, 163-165