

全国 24 都市におけるソメイヨシノの開花日と気温および周辺土地被覆の経年変化

Long-term acceleration of flowering of *Cerasus × yedoensis* 'Somei-yoshino' and changes in air temperature and land cover in 24 cities in Japan

多田 裕樹* 村上 暁信** 手塚 勇太*

Yuki TADA Akinobu MURAKAMI Yuta TEZUKA

Abstract: In order to clarify the long-term phenological shift caused by the urban heat island phenomenon, this study investigated the relationships between flowering dates of *Cerasus × yedoensis* 'Somei-yoshino' and the air temperatures in 24 cities in Japan. It was confirmed that the flowering date was accelerated as the temperature rises during the flower-bud growing period. The actual number of flowering acceleration days tended to be smaller than the expected ones. This is thought to reflect the delay in dormancy breaking due to the rise in temperature during the dormancy breaking period, and this tendency was particularly observed in cold sites. This result shows that there is a difference between sites in the flowering acceleration for the same temperature rise, it should be considered when comparing phenological shifts between some cities. In the group of sites where the average temperature during the flower-bud growing period and the average lowest temperature during the dormancy breaking period were medium, the temperature rise tended to be small. Within each group with similar air temperature condition, the features of "large decrease in NDVI" or "small NDVI in 1985" were commonly seen at sites where the temperature rise were large. However, these features did not explain the relationship between land cover change and temperature rise at all points.

Keywords: phenology, *Cerasus × yedoensis* 'Somei-yoshino', urban heat island, land cover, NDVI

キーワード: 生物季節, ソメイヨシノ, ヒートアイランド現象, 土地被覆, NDVI

1. はじめに

都市における生物多様性保全への要請の高まりを受け、各自治体においても、緑の基本計画や生物多様性地域戦略等において、水と緑のネットワークやエコロジカルネットワークを計画する動きが見られる。生物と環境は相互作用の関係にあるという大原則に立てば、強い環境圧に晒された緑地と、そうでない緑地とでは、異なる生理生態を示す可能性がある。都市環境圧と生物への影響に関する報告は数多くあり（例えば Osone et al.¹⁾）、ネットワーク計画策定においては、都市特有の高温化、乾燥、大気汚染等の環境圧と生物への影響を考慮することが重要であると考えられる。

生物が環境圧に対して示す反応の一つに、生物季節の変化がある。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²⁾、植物においては開花、紅葉、落葉などがこれに当たる。地球温暖化の進行が顕著である昨今、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³⁾。森林生態系においては植物の開花時期が早まり、ポリネーター（受粉媒介者）であるマルハナバチとの接触機会が減り、結実率が低下した事例⁴⁾の報告もある。このような気候変動に起因する、種間の生物季節の応答の差異により生じる接触機会の減少は、生物季節学的不整合（フェノロジカルミスマッチ）と呼ばれ、生物間の相互作用に負の影響をもたらすものとしてさらなる研究の蓄積が求められている。

地球規模での生物季節の変化が懸念される一方、都市特有の温暖環境の変化としてヒートアイランド現象（UHI: Urban Heat Island）がある。都市における気温変化は全球規模よりも顕著⁵⁾であり、生物季節にもより大きな変化をもたらす可能性がある⁶⁾。都市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⁷⁾、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⁸⁾、周辺の土地被覆種類によって開花への影響が異なること⁹⁾が報告されており、UHI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。

UHIは、ある時点における地点間の気温差（気温分布）という空間的差異の側面と、経年的な気温上昇という時間的差異（変化）の側面を有した事象とみることができる。この性質に応じて、UHIによる生物季節への影響という研究課題は次の二つの疑問に分けられる。「UHIの空間的差異により、都市の中にとどの程度の生物季節の差が生じているのか」という疑問と、「UHIによる気温上昇が進行するなかでどの程度の生物季節差が生じているのか」という疑問である。前者については、松本・福岡¹⁰⁾など一定の研究蓄積がある。一方、後者については、大都市の1960～1980年代の気温変化とソメイヨシノ（*Cerasus × yedoensis* 'Somei-yoshino'）の開花を分析した研究¹¹⁾、近年の冬季の温暖化がソメイヨシノの休眠解除に与える影響を分析した研究¹²⁾はあるものの、開花日予測や開花機構の解明に研究関心があり、都市間の気温上昇傾向の差異や周辺環境の経年変化に焦点を当てた研究は見当たらない。空間的繋がりだけでなく、時間的繋がり（蜜源植物の開花時期とミツバチの活動時期の重なり等）まで配慮したエコロジカルネットワーク計画を視野に、今後、都市環境が変化するなかで生じる生物季節への影響を予測するには、これまでの都市環境の変化とそれに伴う気温変化が生物季節にどのように影響してきたのかを知ることが不可欠である。

以上の背景を踏まえ、本研究は、生物季節の経年変化とUHIによる気温変化との関係を明らかにすることを目的とした。第2章では、都市の生物季節の経年変化と、気温の経年変化を把握し、両者の関係を分析する。第3章では、第2章で得られた気温の経年変化の地点間差異をもたらした都市環境の変化の特徴を把握するため、UHIの主因の一つである土地被覆の観点から分析を行う。

2. 開花日の経年変化と気温の関係

(1) 方法

1) 研究対象標本木の抽出

経年的な都市空間形態の変化と生物季節の関係を調べるには、

*筑波大学大学院システム情報工学研究科

**筑波大学システム情報系

長期間にわたる同一個体の生物季節観測データが必要となる。日本においては、気象庁による生物季節観測が1953年より全国各地で行われており、種々の生物季節データの蓄積がある。ソメイヨシノの開花もその一つであり、沖縄を除く46都道府県の48地点において、ソメイヨシノの開花宣言の基準となる標本木が設定され、観測が行われている。本研究では、都市化による影響の差を把握するため、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¹³⁾、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¹⁴⁾¹⁵⁾ため、対象樹種として選定した。標本木は各地の気象台構内に設定されている地点が多いが、庭園や公園等の個体が標本木とされている地点も見られる。気象庁の生物季節観測は基本的に同一個体(標本木)に対して行われるものであるが、気象台の移転、標本木の樹勢衰退等の諸事情により変更されることがある。本研究では、後述の開花日の経年変化および気温の経年変化の比較分析のため、1980年から2010年の約30年間において、標本木に変更がなかった24地点を対象とした(図-1)。これらの標本木の立地環境は、気象台構内が16地点、公園が5地点、寺社が2地点、堤防(緑道)が1地点である。

2) 開花日の経年変化

本研究で対象とする24地点について、1985年から2005年の気象庁の生物季節観測の結果から開花日の変化を把握した。ソメイヨシノの開花日は本研究で扱う都市の周辺環境というスケールの影響だけでなく、暖冬であった2005年には全国的に開花が遅くなった¹⁶⁾ことが報告されるなど、広域的な気象条件による影響も受ける。そのため、開花日は年次間での変動が大きくなり、数年単位で見たときには必ずしも一定の傾向を示すものではない。そこで本研究では、ある年の開花日を評価するのに、前後5年間も含めた10年間の開花日の移動平均値をある年の開花日評価値とすることとした。こうして得られた開花日移動平均値をもとに、本研究では1985年と2005年の移動平均値の差を開花日早期化日数として扱い、気温変化との関係の分析に用いた。

3) 気温の経年変化

ソメイヨシノは、秋から冬の低温に晒されることで花芽の休眠が打破された後、一定以上の気温の積算により花芽が成長することで開花の早晩が決定される。ソメイヨシノの開花日予測については数々の既往研究¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁷⁾¹⁸⁾が存在するが、それらはいずれも温度変換日数(DTS)を利用した積算モデルである。温度変換日数は下記式で表される。

$$t_s = \exp\left(\frac{E_a(T - T_s)}{RTT_s}\right)$$

t_s : 温度変換日数, T : 日平均気温 (K), T_s : 標準温度 (288.2K),

E_a : 温度特性値 (70kJmol⁻¹), R : 普遍気体定数 (8.314J mol⁻¹ K⁻¹)

※ T_s , E_a の値は既往研究¹⁷⁾¹⁸⁾にならった。

開花日推定においては、各地の適切な起算日から t_s の積算を行い、その積算値が所定の数値を超えた日が推定開花日とされる。この積算値について、青野・守屋¹⁷⁾は全国共通で23.8日とする開花日推定モデルを提唱しており、これに改良を加えた青野・村上¹⁸⁾の開花日推定モデルでも同様の積算値を用いている。本研究は開花日の推定を目的としたものではないが、上記の既往研究にない23.8日という積算値をもとに、各地点の平均起算日を算出した。具体的には、気象庁の日平均気温データをもとに t_s を算出し、開花日から逆算して t_s の積算値が23.8を超える日をその年の起算日とした。これを1980~2010年の31年間について計算し、各地点の平均値をその地点の平均起算日とした。

このような休眠打破と花芽成長というソメイヨシノの開花特性

を踏まえ、本研究では開花日推移の分析期間と同じ、1985~2005年について、花芽の成長が進む起算日以降の平均気温と、休眠打破が進む起算日までの最低気温の推移から各地点の気温変化の傾向を把握することとした。前述の通り、ソメイヨシノの花芽は前年夏に形成された後、秋以降の低温に晒されることで徐々に休眠打破が進行する。丸岡・伊藤¹⁹⁾の開花予測モデルでは-8.0~-12.4℃

- : 標本木が気象台構内にある地点
- △: 標本木が気象台以外にある地点

※1980~2010年の標本木の位置による分類であり、1980年以前や現在の標本木の位置を示すものではない。

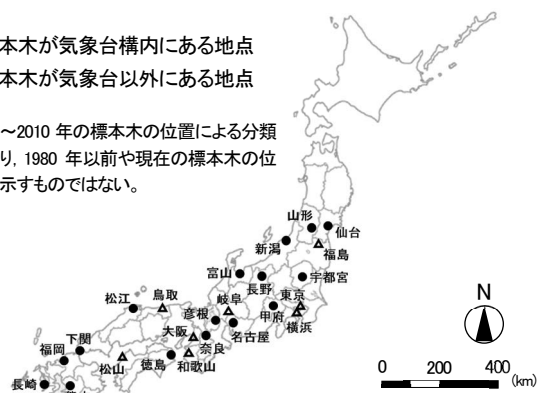


図-1 対象標本木(ソメイヨシノ)

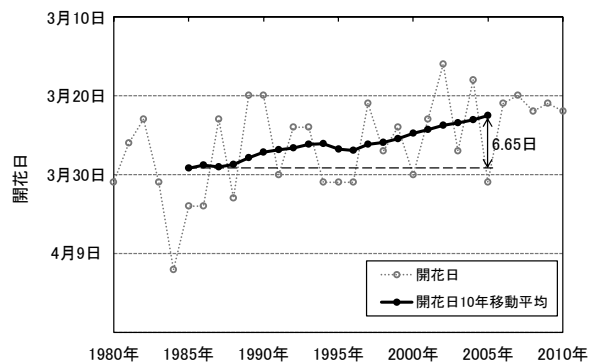


図-2 東京の1980~2010年の開花日および10年移動平均値の推移

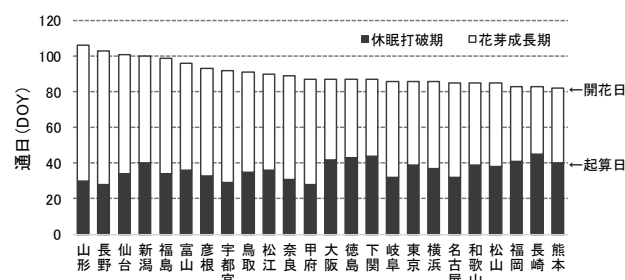


図-3 各地点の1980~2010年の平均開花日と平均起算日

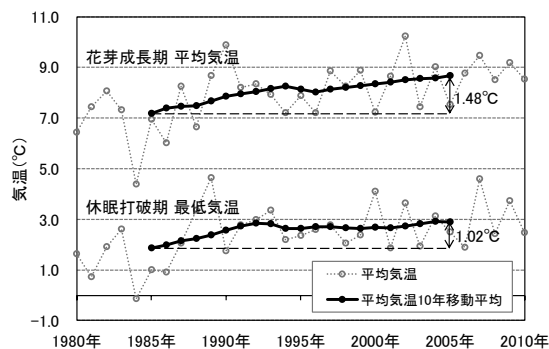


図-4 東京の1980~2010年の花芽成長期の平均気温および休眠打破期の最低気温平均と各10年移動平均値の推移

程度の低温条件下で休眠打破が特に進行するとされていること、本研究の主題であるUHIは1月に最も顕在化する²⁰⁾ことなどから、本研究では1月1日から起算日までを休眠打破期、起算日から開花日までを花芽成長期とした。

気温データは、標本木のある気象台のデータを、標本木が気象台以外にある地点においては最寄りの気象台のデータを用いた。前項の開花日の推移の分析と同様に、1980年～2010年の31年間分のデータを収集し、各年の花芽成長期の日平均気温と休眠打破期の日平均最低気温の10年移動平均値を算出したうえで、1985年と2005年の気温差を各地の気温上昇量として評価した。

(2) 結果

1) 開花日の変化

24地点について、1985年～2005年の開花日の10年移動平均値を算出した。図-2は、東京の1980年～2010年の開花日、1985～2005年の開花日10年移動平均値を示したものである。開花日は年次間での分散が大きいものの、移動平均値の推移からは、徐々に開花日が早まっている傾向が確認できた。東京の1985年と2005年の10年移動平均値の差は6.65日であった。本研究では、この1985年と2005年の10年移動平均値の差を、各地点の開花日の早期化傾向の評価値(開花日早期化日数)とした。開花日早期化日数の最大値は宇都宮の7.80日、最小値は長崎の2.40日であった。

2) 気温の経年変化

1980～2010年の各地点の平均開花日と、日平均気温をもとにした温度変換日数の積算値により推定した平均起算日を図-3に示した。各地点の平均開花日は通日(DOY; Day of Year) 82.3～105.6日と、20日を超える地点間差が確認された。平均起算日は通日で28.0～44.5日であった。花芽成長期(起算日～開花日)は山形の75.8日が最長で、長崎の38.9日が最短であった。

開花日と同様に、24地点について、1985年～2005年の花芽成長期の平均気温と、休眠打破期の平均最低気温の10年移動平均値を算出した。気温も開花日と同様に、年次間での分散が大きいものの、移動平均値の推移を見ると、徐々に気温が上昇している傾向が確認できた。1985年と2005年の移動平均値の差を気温上昇量とすると、東京の花芽成長期の気温上昇量(平均気温)は1.48℃、休眠打破期の気温上昇量(平均最低気温)は1.02℃であった(図-4)。その他の地点についても、1985年と2005年の気温上昇量を比較すると、全地点で2005年の値が大きくなった。花芽成長期の気温上昇量の最大値は、宇都宮の1.70℃、最小値は彦根の0.89℃であった。休眠打破期の気温上昇量の最大値は宇都宮の1.83℃、最小値は長野の0.39℃であった。

3) 開花日の経年変化と気温の経年変化の関係

開花日早期化日数と、気温関連変数(花芽成長期の気温上昇量、花芽成長期の平均気温、休眠打破期の気温上昇量、休眠打破期の平均最低気温)の偏相関係数を算出したところ、開花日早期化日数と花芽成長期の気温上昇量の偏相関係数が0.447となり5%水準で有意という結果が得られた(表-1)。

前述の通り、ソメイヨシノの開花日は日平均気温を変数とする温度変換日数の起算日からの積算値により推定される。このことは、ある年とある年の平均気温上昇量に対して、早期化日数の期待値が得られることを意味する。そして、1985年と2005年の花芽成長期の気温上昇量から期待される開花日の早期化日数を算出した。図-5は早期化日数の期待値と実際の早期化日数を示したものである。松江を除く23地点で、期待値よりも実際の早期化日数が小さくなり、期待値との最大差は山形の6.27日であった。

開花日早期化日数との差が2日以内の群(A群, n=9)、2～4日以内の群(B群, n=10)、4日以上(期待値との差)の群(C群, n=5)に分類した(図-5、表-2)ところ、期待値との差の小さかったA群には花

芽成長期の気温上昇量の小さい地点が多く含まれ、期待値との差の大きかったB群、C群では花芽成長期の気温上昇量の上位～中位の地点が多く含まれた。期待値との差が最も大きかったC群の特徴として、花芽成長期、休眠打破期ともに気温が低い地点が多く含まれることが確認された。「開花日早期化日数の期待値との差」を目的変数、「花芽成長期の気温上昇量」「花芽成長期の平均気温」「休眠打破期の気温上昇量」「休眠打破期の平均最低気温」の4変

表-1 開花日早期化日数と気温関連変数の偏相関係数

	花芽成長期 平均気温	花芽成長期 気温上昇量	休眠打破期 平均最低気温	休眠打破期 気温上昇量
開花日 早期化日数	-0.296	0.447 *	0.151	-0.131

†: p<0.10 * : p<0.05 ** : p<0.01

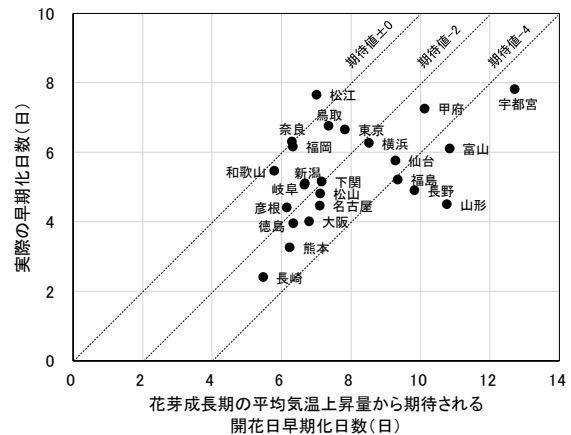


図-5 開花日早期化日数の期待値と実際の早期化日数

表-2 気温上昇量と開花日早期化日数の間に特徴がみられた地点の1月の平均最低気温と上昇量

※()内の数字は24地点中の順位を表す

地点	早期化日数 期待値との差 (日)	花芽成長期 平均気温 (℃)	花芽成長期 気温上昇量 (℃)	休眠打破期 平均最低気温 (℃)	休眠打破期 気温上昇量 (℃)	開花日 早期化日数 (日)
奈良	0.00 (1)	5.81 (15)	0.93 (23)	-0.16 (17)	0.66 (21)	6.30 (6)
福岡	-0.18 (3)	8.94 (2)	1.33 (8)	3.45 (3)	1.15 (4)	6.15 (8)
和歌山	-0.35 (4)	8.01 (7)	1.09 (18)	2.43 (7)	0.89 (16)	5.45 (11)
鳥取	-0.61 (5)	6.19 (14)	1.11 (17)	0.71 (13)	0.43 (23)	6.75 (4)
松江	0.64 (2)	6.39 (13)	1.09 (19)	1.01 (11)	0.69 (20)	7.65 (2)
東京	-1.18 (6)	7.98 (8)	1.48 (5)	2.46 (6)	1.02 (11)	6.65 (5)
新潟	-1.58 (7)	5.52 (18)	0.94 (22)	0.07 (16)	1.06 (7)	5.10 (14)
岐阜	-1.62 (8)	6.55 (12)	1.07 (20)	0.47 (15)	0.63 (22)	5.05 (15)
彦根	-1.76 (9)	5.62 (17)	0.89 (24)	0.67 (14)	0.72 (19)	4.40 (20)
下関	-2.01 (10)	8.82 (3)	1.49 (4)	4.35 (1)	0.99 (12)	5.15 (13)
横浜	-2.26 (11)	7.63 (10)	1.54 (2)	2.20 (8)	1.18 (3)	6.25 (7)
松山	-2.32 (12)	7.97 (9)	1.34 (7)	2.11 (9)	0.95 (14)	4.80 (17)
徳島	-2.40 (13)	8.30 (5)	1.23 (12)	2.51 (5)	0.93 (15)	3.95 (22)
名古屋	-2.65 (14)	6.58 (11)	1.14 (15)	0.77 (12)	0.82 (17)	4.45 (19)
大阪	-2.80 (15)	8.15 (6)	1.30 (9)	2.63 (4)	1.05 (9)	4.00 (21)
甲府	-2.88 (16)	5.71 (16)	1.47 (6)	-2.36 (21)	1.05 (8)	7.25 (3)
熊本	-2.99 (17)	8.80 (4)	1.29 (10)	1.17 (10)	1.43 (2)	3.25 (23)
長崎	-3.07 (18)	9.61 (1)	1.24 (11)	3.73 (2)	0.76 (18)	2.40 (24)
仙台	-3.53 (19)	4.40 (22)	1.14 (14)	-1.76 (19)	1.03 (10)	5.75 (10)
福島	-4.15 (20)	4.60 (21)	1.17 (13)	-1.84 (20)	0.96 (13)	5.20 (12)
富山	-4.74 (21)	5.32 (19)	1.49 (3)	-0.29 (18)	1.12 (6)	6.10 (9)
宇都宮	-4.91 (22)	5.02 (20)	1.70 (1)	-2.76 (22)	1.83 (1)	7.80 (1)
長野	-4.93 (23)	2.88 (24)	1.04 (21)	-4.06 (24)	0.39 (24)	4.90 (16)
山形	-6.27 (24)	3.03 (23)	1.14 (16)	-3.38 (23)	1.14 (5)	4.50 (18)

□ : 上位8地点
□ : 中位8地点
□ : 下位8地点

表-3 開花日早期化日数の期待値と実際の開花日の差を目的変数とする重回帰分析の結果

説明変数	偏回帰係数	標準 偏回帰係数	偏相関
花芽成長期 気温上昇量	3.193 *	0.391	0.487
休眠打破期 平均最低気温	-0.502 **	-0.667	-0.689
定数項	-1.210		
修正決定係数(修正R ²)	0.472		

†: p<0.10 * : p<0.05 ** : p<0.01

数を説明変数とし、ステップワイズ法により変数を選定した上で、重回帰分析を行った結果が表-3である。「花芽成長期の気温上昇量」は5%水準で、「休眠打破期の平均最低気温」は1%水準で有意に説明力のある変数と判定された。花芽成長期の気温上昇量が大きい地点ほど、あるいは、休眠打破期の平均気温が低い地点ほど、開花日早期化日数の期待値と実際の早期化日数の差が大きくなる傾向がみられた。

(3) 考察

本研究で対象とした24地点すべてで、開花日の10年移動平均値は1985年よりも2005年で早くなったことから、全国的に開花日は早期化の傾向にあったことが確認された。この点は、気象庁¹⁴⁾の報告とも合致するものである。

早期化日数は最大で7.80日(宇都宮)、最小で2.40日(長崎)と地点間で差異がみられた。この差について花芽成長期と休眠打破期の平均気温および気温上昇量から分析を行ったところ、「花芽成長期の気温上昇量」と「休眠打破期の平均最低気温」が有意な説明変数であることが確認された。これは、花芽成長期の気温上昇量が大きいほど開花が早まるというソメイヨシノの開花機構を反映した結果であると考えられる。さらに、休眠打破期の平均最低気温が低い地点ほど気温上昇による影響が現れやすいものと考えられ、花芽成長期の気温上昇量が等しくとも、その影響はその地域の気候条件によっても異なることが示唆された。しかし、鳥取や松江のように、花芽成長期の気温上昇量が小さく、休眠打破期の平均最低気温が中位であるにも関わらず、開花日早期化日数が大きくなるなど、一部の地点では異なる傾向も見られた。

松江を除く23地点で、気温上昇量から期待される早期化日数よりも実際の早期化日数が小さくなった。早期化日数の期待値を花芽成長期(起算日から開花日)の気温上昇量から算出しているが、丸岡・伊藤¹⁹⁾の「温暖化の進行に従い、ソメイヨシノの生長が早まり開花日も早くなるものの、さらに気温が高まると、休眠打破の遅れから開花が次第に遅くなる」という指摘のように、休眠打破期の気温上昇は開花を遅らせる方向に作用する。つまり、期待値と実際の早期化日数の差は、休眠打破の遅れによるものと推察される。そして、期待値との差が大きくなったC群の地点はいずれも休眠打破期の気温が低いことや、重回帰分析(表-3)にて「休眠打破期の平均最低気温」が有意な説明変数と判定されたことを踏まえると、気温の低い地点ほど気温上昇による休眠打破期の遅れが大きくなりやすいと考えられる。

上述の傾向がすべての地点の気温上昇量と開花日早期化の関係を説明するものではないが、これらの結果は、花芽成長期の気温が高くなるほど開花は早期化するという大きな傾向がありつつも、同時に休眠打破期の遅れにもつながる可能性があるということ、また、その影響は気温が低い地点で現れやすいことが示唆された。

3. 気温変化と周辺土地被覆の変化の関係

本研究は、UHIと生物季節の関係に焦点を当てたものであり、第2章において各地点の気温上昇量に差が見られたことから、第3章では気温上昇量に差が見られた理由をUHIの要因から分析することとした。UHIの主要因は、都市の「土地利用の変化(植生域の縮小と人工被覆域の拡大)」と「人工排熱(人間活動で生じる熱)の増大」である⁵⁾。後者は前者に連動するものとも考えられるため、本研究では、土地被覆の経年変化の特徴と気温変化の関係について分析を行った。

(1) 方法

標本木周辺の土地被覆の経年変化を把握するには、日本全国のソメイヨシノ標本木の周辺環境を都市化の前後で比較する必要がある。このような広域的環境の定量的評価には、リモートセンシング(RS)データが有効である。さらに、過去との比較が可能と

いう条件に合致するRSデータとして、1972年に1号機が打ち上げられた地球観測衛星Landsatの衛星RSデータがある。Landsatは、1982年に打ち上げられた4号機以降は可視域や近赤外域を含む複数の観測波長帯について、分解能30mのデータが利用可能である。本研究においては、TM(Thematic mapper)センサーを搭載し、1984年から2012年まで観測が行われたLandsat5号機のRSデータ(表-4)を用いて、1985年と2005年の2年代について、ソメイヨシノの開花に関わる冬季のデータを比較することとした。RSデータは基本的に、1月1日~2月28日の期間内で、雲や雪の影響が少ないものとしたが、1985年および2005年で適当なRSデータが得られない場合、直近の年のデータを使用した。また、1~2月の期間内において、適当なRSデータが得られなかった地点(1985年:新潟、富山、2005年:山形、福島、富山)については、例外的に12月15日~12月31日のRSデータを使用した。なお、本稿においては、1985年、2005年の前後の年のRSデータについても、便宜上、それぞれ1985年、2005年のデータとして記述する。

Landsat TMデータはデジタル値(DN: Digital number)で格納されている。DNは放射輝度の相対的な大きさを表すものであり、対象物の反射率の他、太陽と対象物とセンサーの位置関係や大気中の水蒸気量等の影響を受けることから、解析に際しては放射輝度および反射率への変換が必要となる。変換は下記式を用いて行った。

$$L_{\lambda} = \frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) \times (QCAL - QCALMIN)}{(QCALMAX - QCALMIN)} + LMIN_{\lambda}$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos \theta}$$

L_{λ} : 放射輝度, $LMAX_{\lambda}$: RSデータ中の放射輝度最大値, $LMIN_{\lambda}$: RSデータ中の放射輝度最小値, Q_{cal} : DN, $Q_{cal}MAX$: RSデータ中のDN最大値, $Q_{cal}MIN$: RSデータ中のDN最小値, ρ_{λ} : 反射率, $ESUN_{\lambda}$: 分光太陽照度, d : 地球・太陽間距離, θ : 太陽天頂角

周辺の土地被覆の評価には、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index; 正規化植生指数)およびMNDWI(Modified Normalized Difference Water Index; 改良型正規化水指数)を用いた。NDVIは植生の有無や活性度を示す値であり、下記式により算出される。

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

NIR : 近赤外域(Band 4)の反射率, Red : 赤色域(Band 3)の反射率

分解能30mのRSデータで都市空間を分析すると、各ピクセル内に複数種類の土地被覆が混在することとなり、各ピクセルが有する各Bandの反射率は、あらゆる被覆からの反射率を平均化したものとなる。このようなデータに土地被覆分類を行った場合、舗装や建築物といった人工物が優占するピクセルは人工物として評価され、そのピクセル内に含まれる少量の緑地の存在は反映されない。一方、NDVIはピクセル内のあらゆる被覆の反射率の平均値から計算されるため、その数値の大小はピクセル内に含まれる緑量を示す指数として扱うことが可能である。逆の視点で見れば、都市の一定範囲におけるNDVIの大小は、舗装や建築物等の人工物の多寡についても一定の評価が可能と言えることから、本研究では都市化の程度の指標としてNDVIを用いることとした。

NDVIは植物に含まれるクロロフィルの分光反射特性を利用した指数であり、人工舗装面や建築物および水面では低い値となる。本研究では都市化の程度を評価するためにNDVIを用いるが、自然土地被覆である水面が、人工舗装面や建築物と同じ方向に評価

されることは不相当である。そこで本研究では、MNDWIを用いて水面を抽出した。MNDWIは水の分光反射特性を生かした指数で、下記式により算出される。

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$$

MIR: 中間赤外域(Band 5)の反射率, Green: 緑色域(Band 2)の反射率

MNDWIを算出したうえで、可視画像を参照しながら、水面として評価する閾値を解析画像ごとに設定し、水面の抽出を行った。

以上の手順により得られた水面面積およびNDVIをもとに標本木周辺の周辺土地被覆を評価した。評価範囲は標本木の周囲100, 200, 500, 1,000, 2,000mとした。解析対象範囲から水面の範囲を求め、水面以外の範囲におけるNDVI平均値を算出した。なお、本研究では1985年、2005年ともに、Landsat 5で観測されたTMデータを使用しているが、異なる年代の別画像を評価しているため、NDVIの増加あるいは減少を、単純に緑量の増加あるいは減少(人工物の減少あるいは増加)と評価することには注意が必要である。本研究では、変化量の大きい地点においては変化の傾向が示されたものとして取り扱った。

(2) 結果

1) 1985年と2005年のNDVIおよびその変化

Landsat TMデータをもとにMNDWIを算出し、水域範囲を抽出した上で、水域以外の範囲のNDVIを算出した(標本木から半径100m, 200m, 500m, 1,000m, 2,000mの範囲内の、1985年NDVI平均値、1985年と2005年のNDVI変化量、水面率の詳細は表-6を参照のこと)。全解析半径において、NDVIは概ね0.05~0.3程度の値となった。各地点の1985年と2005年のNDVIを比較すると、地点によってNDVIの増減量に差がみられた。全解析半径でNDVIが減少した地点は、宇都宮、長野、富山、彦根、徳島で、反対に全解析半径でNDVIが増加した地点は、山形、松江、鳥取、福岡、大阪であった。周辺の水面の割合が15%を超えた地点および半径は、横浜(2,000m)、彦根(1,000m・2,000m)、下関(500m・1,000m・2,000m)、福岡(200m)、長崎(500m・1,000m・2,000m)であった。

2) NDVIの経年変化と気温の経年変化の関係

「NDVIの減少量が大きい地点ほど、平均気温上昇量大きい」という仮説をもとに、解析半径ごとに、NDVI変化量と気温上昇量との相関分析を行ったところ、NDVI変化量と気温上昇量の相関係数はすべて負の値となったものの、その値は小さく、NDVI変化量と気温上昇量の間に相関関係は確認できなかった(表-5)。

ここで、UHIの気温上昇の傾向には地域間差がある²¹⁾ことを踏まえ、「花芽成長期の平均気温」と「休眠打破期の平均最低気温」の2指標をもとにクラスター分析を行い、24地点をI~IIIの3群に分類した(図-7)。これらの3群の気温上昇量、1985年NDVI、

表-4 Landsat TMの観測波長帯と分解能

Band	観測波長帯(nm)	分解能(m)
1	450 ~ 520 可視(青)	30
2	530 ~ 600 可視(緑)	30
3	630 ~ 690 可視(赤)	30
4	760 ~ 900 近赤外	30
5	1550 ~ 1750 中間赤外	30
6	10400 ~ 12500 熱赤外	120
7	2080 ~ 2350 中間赤外	30

表-5 NDVI変化量と気温上昇量の相関係数

NDVI変化量	n	花芽成長期	休眠打破期
		気温上昇量	気温上昇量
100m	24	-0.179	-0.100
200m	24	-0.131	-0.087
500m	24	-0.057	-0.107
1,000m	24	-0.104	-0.195
2,000m	24	-0.058	-0.166

t: p<0.10 * : p<0.05 ** : p<0.01

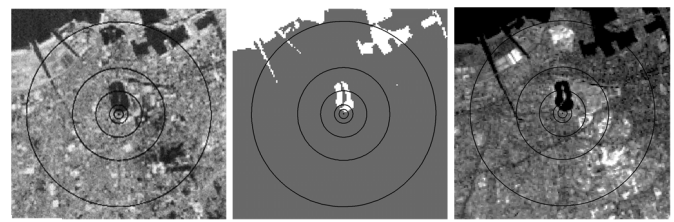


図-6 衛星RSデータの解析画像例(1985年福岡)

※ 図中の円は標本木を中心とするNDVIの解析半径であり、内側から半径100m, 200m, 500m, 1,000m, 2,000mを表す。
※ MNDWI画像は閾値を設定し、水面のみを白色で表現したものを。

NDVI変化量(2005年NDVI-1985年NDVI)、水面率を示したものが表-6である。

平均気温(花芽成長期の平均気温と休眠打破期の平均最低気温の両方を指す。以下、特段の指定なく「平均気温」と表現した場合には同様の解釈とする)が中位の群(II群)では8地点中6地点が、気温上昇量(花芽成長期、休眠打破期とも)が下位の地点であるなど、気温上昇量が小さい傾向がみられた。平均気温が下位のI群と上位のIII群には、気温上昇量が上位~中位の地点が多く含まれた。

気温上昇量の小さい地点の多かったII群において、特異的に気温上昇量の大きかった富山では、NDVI減少量が大きいという特徴が見られた。同様の特徴は、I群内で気温上昇量の大きかった宇都宮や甲府でも確認された。III群内で気温上昇量の大きかった地点を見ると、福岡や東京では1985年のNDVIが小さい傾向が見られ、横浜では主に半径1,000, 2,000mの広域で1985年のNDVIが小さく、NDVI減少量も大きい傾向が見られた。このように、各群内の気温上昇量の大きい地点では、共通の土地被覆の傾向が確認された。一方で、長野、名古屋、徳島のように、NDVI減少量は大きいものの、気温上昇量が小さい地点も存在した。また、解析半径の違いによる明確な影響の差は見られなかった。

(3) 考察

NDVI減少量と平均気温上昇量の間に単純な相関関係は確認できなかったが(表-5)、各地点の2時期の平均気温を指標にクラスター分析で分類された各群の特徴を見ると、平均気温が中位の群(II群)に気温上昇量の小さい地点が多く含まれた。他方で、各群で気温上昇量の大きかった地点の土地被覆(1985年NDVI, NDVI変化量, 水面率)を見ると、「NDVIの減少量が大きい」あるいは「1985年のNDVIが小さい」という特徴が共通して見られた。「NDVIの減少量が大きい」ことは、本分析の仮説でもある土地被覆の人工化が進んだことによる気温上昇を意味するものと考えられる。「1985年のNDVIが小さい」ことは、1985年時点で周辺土地被覆の人工化が進んでおり、さらなる土地被覆変化の影響

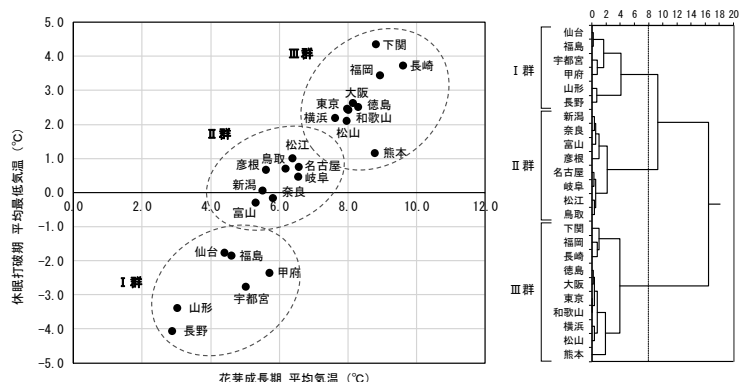


図-7 花芽成長期の平均気温と休眠打破期の平均最低気温(左)とこれら2指標によるクラスター分析の樹形図(右)

表-6 各地点および各分類群の気温上昇量・1985年NDVI・NDVI変化量・水面率

□:上位8地点
 □:中位8地点
 □:下位8地点

群	地点	気温上昇量(°C)					1985年NDVI					NDVI変化量(2005年NDVI-1985年NDVI)					水面率(%)					
		花芽成長期		休眠打破期			100m	200m	500m	1,000m	2,000m	100m	200m	500m	1,000m	2,000m	100m	200m	500m	1,000m	2,000m	
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	
I	仙台	1.14	1.03	0.118	0.102	0.086	0.075	0.070	0.037	0.037	0.010	0.006	-0.005	0.0	0.2	0.7	0.14	0.3	0.3	0.16	0.3	1.8
	福島	1.17	0.96	0.255	0.212	0.190	0.165	0.134	0.028	0.027	0.011	0.005	-0.002	0	0	0.7	0.14	5.0	7.7	4.9	8.9	
	宇都宮	1.70	1.83	0.136	0.126	0.123	0.131	0.135	-0.033	-0.038	-0.024	-0.027	-0.025	0	0	0.7	0.14	0	19	0.0	23	
	甲府	1.47	1.05	0.119	0.114	0.106	0.110	0.117	-0.021	-0.010	-0.005	-0.005	0.000	0	0	0.7	0.14	0	19	0	24	
	山形	1.14	1.14	0.066	0.057	0.050	0.048	0.058	0.056	0.033	0.012	0.024	0.021	0	0	0.7	0.14	0.2	11	1.6	13	
II	長野	1.04	0.39	0.096	0.128	0.113	0.118	0.128	-0.015	-0.017	-0.009	-0.013	-0.003	0	0	0.7	0.14	0	19	0.1	20	
	新潟	0.94	1.06	0.064	0.026	0.024	0.030	0.044	0.009	0.026	0.013	0.003	-0.003	0	0	0.7	0.14	7.9	2.2	14.1	4.4	
	富山	1.49	1.12	0.259	0.211	0.168	0.168	0.164	-0.093	-0.036	-0.011	-0.009	-0.011	0	0	0.7	0.14	7.0	5.5	6.9	5.5	
	奈良	0.93	0.66	0.249	0.227	0.156	0.154	0.186	-0.019	-0.010	-0.002	-0.007	-0.013	0	0	0.7	0.14	0.3	10.0	0.1	18.0	
	彦根	0.89	0.72	0.144	0.121	0.128	0.129	0.123	-0.035	-0.023	-0.021	-0.006	-0.001	0	0	0.7	0.14	4.3	6.0	21.8	3.3	
III	名古屋	1.14	0.82	0.164	0.147	0.136	0.145	0.149	0.010	-0.029	-0.032	-0.031	-0.025	0	0	0.7	0.14	1.3	13.0	0.4	17.0	
	岐阜	1.07	0.63	0.080	0.069	0.071	0.075	0.101	0.000	0.001	-0.002	-0.007	-0.009	0	0	0.7	0.14	0	19	0.0	22	
	松江	1.09	0.69	0.081	0.081	0.072	0.078	0.090	0.030	0.016	0.003	0.014	0.011	0	0	0.7	0.14	2.5	11.1	11.0	5.5	
	鳥取	1.11	0.43	0.138	0.175	0.170	0.178	0.182	0.050	0.033	0.056	0.073	0.069	0	0	0.7	0.14	0.1	13.0	0.1	17.0	
	下関	1.49	0.99	0.032	0.024	0.024	0.044	0.104	0.005	0.013	0.004	0.005	-0.001	0	0	0.7	0.14	0.7	4.4	21.8	2.7	
IV	福岡	1.33	1.15	0.085	0.065	0.096	0.096	0.075	0.028	0.043	0.033	0.030	0.036	2	10.8	1.1	20.3	1.4	14.4	3.3	4.9	
	長崎	1.24	0.76	0.095	0.112	0.096	0.134	0.185	-0.003	-0.005	0.000	0.009	-0.046	0	0	0.7	0.14	24.4	1.1	32.7	1.1	
	徳島	1.23	0.93	0.092	0.077	0.094	0.085	0.102	-0.005	-0.013	-0.024	-0.020	-0.027	0	0	0.7	0.14	5.3	6.0	10.9	6.0	
	東京	1.48	1.02	0.137	0.109	0.066	0.077	0.074	0.004	0.014	0.000	-0.003	-0.001	0	0	0.7	0.14	2.3	8.0	2.4	12.0	
	大阪	1.30	1.05	0.112	0.120	0.063	0.032	0.012	0.036	0.053	0.064	0.062	0.068	0.034	0	0	0.7	0.14	0.7	6.0	3.4	7.0
V	横浜	1.54	1.18	0.171	0.158	0.115	0.090	0.083	0.069	0.1	0.038	0.001	-0.012	-0.011	0	0	0.7	0.14	4.9	8.0	15.9	
	和歌山	1.09	0.89	0.208	0.186	0.191	0.272	0.258	-0.005	0.021	0.000	-0.044	-0.056	0	0	0.7	0.14	2.9	3.0	1.1	9.0	
	松山	1.34	0.95	0.157	0.147	0.147	0.193	0.215	0.001	0.015	0.003	-0.014	-0.014	0	0	0.7	0.14	0	19	0.1	21.0	
	熊本	1.29	1.43	0.198	0.164	0.136	0.138	0.153	0.013	0.010	-0.001	-0.005	-0.003	-0.007	0	0	0.7	0.14	0.2	12.0	0.1	

※()内の数字は24地点中の順位を表す ※半径100m, 200m, 500mの水面率については0%の地点のみを着色

や、UHI のもう一つの主因である「人工排熱の増大」の影響が緩和されずに気温上昇に結び付いた可能性などが考えられた。一方で、NDVI 減少量が比較的大きかった長野、名古屋、徳島では気温上昇量は中位～下位になるなど、NDVI 変化量や1985年NDVI がすべての地点の土地被覆と気温上昇量の関係を説明するものではなかった。

4. 結論

本研究は、都市の高温化、特にUHIに伴う生物季節の変化を明らかにすべく、ソメイヨシノの開花日の経年変化と、花芽成長期の平均気温と休眠打破期の最低気温との関係を調べ、さらに、各地の気温条件が形成された要因をUHIの主因の一つである土地被覆(NDVIにて評価)の観点から分析したものである。本研究から以下の知見が得られた。

- 1) 花芽成長期の平均気温上昇量が大きい地点ほど、開花日が早期化しやすい傾向にあり、UHIの程度の差が開花日早期化日数の地点間差の要因となったものと考えられた。
- 2) 花芽成長期の平均気温上昇量から期待される開花日早期化日数に対して、実際の開花日早期化日数は小さい傾向がみられた。これは休眠打破期の気温上昇による休眠打破の遅れを反映したものと考えられるが、この傾向は寒地(休眠打破期の平均最低気温が低い地点)で特に顕著であった。この結果は、同じ気温上昇量に対しても開花日の早期化には地点間差、地域間差があることを示しており、今後、生物季節の変化を都市間で比較する際には考慮すべき事項であると考えられた。
- 3) 花芽成長期の平均気温と休眠打破期の平均最低気温が中位の地点群において気温上昇量が小さい傾向が見られた。同程度の土地被覆の変化に対する気温上昇量は一律ではなく、地域の気候特性も影響していることが示唆された。
- 4) 花芽成長期の平均気温と休眠打破期の平均最低気温が類似の群内において、気温上昇量の大きい地点には「NDVI減少量が大きい」あるいは「1985年のNDVIが小さい」という特徴が共通して見られた。ただし、これらの特徴はすべての地点の土地被覆変化と気温上昇量の関係を説明するものではなかった。

本研究はまだ研究蓄積が限定的な「UHIの経年変化が生物季節に与える影響」について、衛星RSデータをもとに分析を行い、その概観を捉えたものである。今後さらに、生物季節に影響の現れやすい都市の条件を解明していくためには、既往研究⁹⁾でも指摘されている人工物の種類(建築物か舗装か)や裸地の影響、建物の高層化の影響、UHIのもう一つの主因である人工排熱の影響を考

慮した分析が必要となるだろう。そしてその際には、本研究結果からも示唆されたように、気候条件の違いを踏まえた適切な対象地の選定がなされるべきである。

補注及び引用文献

- 1) Osone, Y., Kawarasaki, S., Ishida, A., Kikuchi, S., Shimizu, A., Yazaki, K., Aikawa, S., Yamaguchi, M., Izuta, T., Matsumoto, G.I. (2014): Responses of gas-exchange rates and water relations of annual fluctuation of weather in three species of urban street trees: Tree physiolog 34: 1056-1068
- 2) 菊沢真一郎 (1999): 地球変化とフェノロジー: 環境変動と生物集団 (河野昭一・井村治編著): 海遊舎, 東京, 36-52
- 3) 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
- 4) 工藤岳 (2008): 地球温暖化と森林生態系-フェノロジーを介した生物間相互作用への影響: 森林科学 52, 14-18
- 5) 気象庁 (2017): ヒートアイランド監視報告2016, 63pp
- 6) Jocher, S. and Menzel, A. (2015): Urban phenological studies - Past, present, future: Environ Pollut. 203, 250-261
- 7) 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
- 8) 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 (6), 322-334
- 9) 多田裕樹・村上曉信 (2011): 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: ランドスケープ研究 74 (5), 511-514
- 10) 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
- 11) 小元敬男・青野靖之 (1990): 都市昇温のサクラの開花に及ぼす影響について: 農業気象 46 (3), 123-129
- 12) 松本太 (2017): 近年におけるサクラの開花と冬季の温暖化: 日本気象学会雑誌 54 (1), 3-11
- 13) Innan, H., R. Terauchi, N. T. Miyashita, K. Tsunewaki (1995): DNA fingerprinting study on the intraspecific variation and the origin of Prunus yedoensis (Someiyoshino): Jpn. J. Genet. 70, 185-196
- 14) 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 (3), 147-151
- 15) 気象庁 (1996): 新しいサクラの開花予想: 気象庁解説資料 24, 51pp
- 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
- 17) 青野靖之・守屋千晶 (2003): 休眠解除を考慮したソメイヨシノの開花日推定モデルの一般化: 農業気象 59 (2), 165-177
- 18) 青野靖之・村上なつき (2017): 自発休眠期の気温を考慮したソメイヨシノの開花日の簡便な推定法: 生物と気象 17, 25-33
- 19) 丸岡知浩・伊藤久徳 (2009): わが国のサクラ(ソメイヨシノ)の開花に対する地球温暖化の影響: 農業気象 65 (3), 283-296
- 20) ヒートアイランド強度(高温域と低温域の気温差)は冬季の夜間に最大化する⁹⁾。また、国内で最低気温が最も低下するのは1月である。
- 21) 環境省 (2012): ヒートアイランド現象の現状: ヒートアイランド対策マニュアル, 1-16
- 22) 三上岳彦 (2005): 都市のヒートアイランド現象とその形成要因-東京首都圏の事例研究: 地学雑誌 114 (3), 496-506

(2019.9.28受付, 2020.3.30受理)