

植物季節の長期変化と気候変化

Long-term change in climate and floral phenophase

青野 靖之*

Yasuyuki AONO*

大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科

Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University

摘 要

京都で書かれた文献史料に残された、ヤマザクラの満開に関する植物季節記録にもとづいて、過去 1200 年間の満開日推移を明らかにするとともに、それを用いた 3 月平均気温の推移を復元した。新たな調査によるものも含め、合計 822 年分の満開日データを解析に用いた。データを充実させるために、ヤマブキとフジの開花記録によるヤマザクラの推定満開日も併用した。9 世紀以降の満開日推移には、150 ～ 200 年の周期で極めて遅くなる時期が現れた。満開日にもとづく 3 月平均気温の復元値は 10 世紀で現代より高くなった一方で、14 世紀以降には四度にわたって 5℃ 前後への低下を繰り返した。この気温変化は太陽活動の盛衰にほぼ同期して起きており、太陽活動の気候に対する影響の大きさがうかがえた。19 世紀前半～現在の気温上昇幅(3.4℃)のうち、1.6℃ は都市昇温によるもの、残る 1.8℃ は東アジア全体といった広域で起きた気候回復によるものと見られる。

キーワード：気候復元，太陽周期，文献史料，満開日，ヤマザクラ

Key words：climate reconstruction, solar variation, historical documents, full-flowering date, *Prunus jamasakura*

1. はじめに

植物季節現象の現れる時期は、それまでの植物の生育中に受けた気象条件次第で年ごとに変動する。ヨーロッパでは、植物季節現象が季節推移の遅れ・進みを表す指標とみなされ、これらの観測が早くも 18 世紀～19 世紀前半から行われており^{1), 2)}、これらの観測結果を気候学的に評価・解析した研究例も多い^{3) - 5)}。

一方、日本の気象台・測候所における植物季節観測は 20 世紀初頭に始まった。20 世紀前半に大きな発展を見せた日本の気候学では、天候・季節推移、地域の小気候などと並んで、植物季節がすでに主要な研究対象となっていた⁶⁾。中原^{7), 8)}は、日本における植物季節現象の出現日の地理的分布を科学的に初めて解析し、その特徴を明らかにした。また、大後・鈴木⁹⁾は、極めて多くの動・植物季節現象の出現日分布を明らかにするとともに、それまでの知見や文献をまとめた。

ところで、日本を含む温帯では気温条件が植物季節現象の出現日を左右することが多い。気温と植物季節の出現時期との間に密接な関係を求められれば、河村¹⁰⁾が指摘したように、近代気象観測の開始

以前でも植物季節を使って気温を復元することができ、それにより明らかとなった長期にわたる気候変動の振幅や周期を気候予測に資することも可能となる。

観測目的や手段があらかじめ決められた植物季節観測は、上に述べたように早くてもせいぜい 18 世紀から始まったに過ぎない。しかしながら、一般の文書史料に残っていた記録を調査・整理・集積することで、より長期間にわたる植物季節現象の出現日の累年データが構築された例がある。たとえばフランスでは、ワイン用ブドウの毎年の収穫日に関する記録を収集・整理した Chuine *et al.*¹¹⁾によって、14 世紀からの春～夏季の気温推移が復元された研究が有名である。Garnier *et al.*¹²⁾も、戦乱など当時の社会的な状況が収穫期を左右する場合もあるものの、同様にブドウの収穫期に関する記録が気候変動の指標として応用できるとしている。

一方、日本では日記などの古記録中にサクラの満開に関連する記述が日付とともに記載されており、これを植物季節データとして使用できることを田口¹³⁾が初めて指摘した。サクラの満開に関する記述は、花宴・花見に関する記述と日記中の同じ日の条に記載されることが多く、双方の記述とも、ほぼサクラ

受付：2011 年 9 月 7 日，受理：2012 年 1 月 7 日

* 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1, e-mail: aono@envi.osakafu-u.ac.jp

の満開日を示す植物季節データとみなすことが可能である。京都については田口¹³⁾によるデータ収集の後、荒川¹⁴⁾、Arakawa¹⁵⁾によりデータがさらに整理されるとともに、このデータが初めて海外にも紹介された。この研究により、世紀ごとの開花時期の遅速などが考察されたが、データが極めて少ない時代もあり、時系列として連続した気候の復元までには至らなかった。

この後も、関口¹⁶⁾、青野・小元¹⁷⁾、Aono and Kazui¹⁸⁾、Aono and Saito¹⁹⁾が多くの古記録を調査し、そのついで見いだされたデータが追加・入替・整理されてきた。これらのデータは、近畿地方で最も一般的な自生種のヤマザクラの満開日とみなされた。上記の一連の研究によって、これまでに700年分以上の満開日が判明し、9世紀から現代へと続く、長期にわたる植物季節データを整備することができた。そしてこのデータにもとづいて、3月平均気温の長期変化が復元されてきた。

ここでは、これまで筆者の研究などにより集積した京都のヤマザクラの満開日データに、このたび調査・収集したデータも新たに加え、それらをもとに満開日の長期変化の特徴を述べる。また、このデータを使って復元した3月平均気温の推移について解説する。そして、その復元推移の特徴に関して、太陽活動の盛衰や都市温暖化の推移などに関連づけながら、総合的に考察する。

2. ヤマザクラの満開日データ

2.1 データの収集方法

京都におけるヤマザクラの満開日データは、主として日記などの一次史料や年代記類の二次史料を含む古記録を対象とした史料調査によって収集されたものである。今回の史料調査では、青野²⁰⁾と同様にデータの確からしさを判断するため、記載内容によって以下のタイプ1からタイプ4の4種類にデータを区分した。タイプ1は満開の状態を表す史料による記述、または新聞紙上の記事や広告にもとづいた近現代(本研究では1880年代以後とした)のデータである。さらに、タイプ2は花見などの鑑賞に関する記述、タイプ3はサクラの枝の進上・献納に関する記述、タイプ4は和歌の題または歌の内容の記述である。これらの区分番号が若いほど信頼性の高いデータと考えられる(データの質や特徴に関する詳細は青野²⁰⁾を参照)。この区分はデータの質を向上させるために使用される。たとえば、同じ年について複数のデータが見つかった場合、区分番号の若い方を優先的に選ぶことによって、データの質の高さを維持・向上させることができる。これら4つのタイプのいずれかの記述が見いだされた日付を収集・整理し、現行暦に変換することにより現代の満開日データに接続可能なデータとして整備した。

ところで、京都では古い史料ほど散逸部分が多く、その分、得られる満開日データが少なくなり、その時代の気温の復元精度の低下を招く。満開日データの空白を補完する目的で、春に開花するフジとヤマブキの満開日の記録も併せて史料から調査し、それらをヤマザクラの満開日の推定に用いることにした。フジの満開日によるヤマザクラの満開日の推定にはAono and Saito¹⁹⁾による式を用いた。またヤマブキの満開日によるヤマザクラの満開日の推定方法は青野²⁰⁾によった。これらにもとづき、仮にヤマザクラの満開日がわからない年であってもフジもしくはヤマブキの満開日データが得られた場合、ヤマザクラの満開日を推定して気温復元に用いることにした。

2.2 満開日データの調査結果

表1は、既往の気温復元研究で収集・整理されたデータに、今回の史料調査の結果にもとづく追加・入替を行った後のデータ数を世紀別に集計したもので、記述内容に従い区分して示した。データの総数は9世紀~21世紀(2010年まで)の期間中で合計822年分となった。判明した満開日のデータ数を世紀ごとに見ると、時代が古いほど少ないことがわかる。

データ数を記述内容ごとに確かめると、タイプ2(花見・花宴)が最も多く453年分と全データの過半数を占め、次いでタイプ1(満開の記述)、タイプ4(和歌の題など)、タイプ3(サクラの枝の進上・献納)の順に多かった。また、これらとは別に、フジの満開日からの推定値が合計11年分、ヤマブキの満開日からの推定値も合計3年分、ヤマザクラの満開日データとして加えられた。

2.3 ヤマザクラの満開日の長期変化

図1は、新たに追加・入替を行ったデータを含めた満開日の年々変化を示したものである。本研究で追加・入替を行ったデータは合計49年分となった(図中の○)。データが新たに判明した年は10世紀から21世紀までにわたった。新たなデータを最も多く(14年分)見いだせたのは19世紀であった。また、これまで満開日データがほとんど見いだせず直近の研究¹⁹⁾で気温の推移が復元できなかった11世紀でも、今回の調査では6年分のデータを新たに見いだせた。

この約1,200年間の長期にわたる満開日の推移の全般的な特徴を把握するため、図2に年代(10年)ごとに計算した満開日のブロック平均値の推移を示す。この図では、満開日が150~200年程度の周期で変動を繰り返しているのが明らかにわかる。たとえば、おのおのの10年のうち過半数(5年以上)の満開日が判明している年代の平均満開日(●)が、DOY 110(4月20日)前後と今日の京都より極めて遅くなった時代は、1170年代、1320~1350年代、1510~1540年代、1660~1700年代、1810~1830年

表1 ヤマザクラの満開日データ数. 記述内容によって区分し, それを世紀ごとに示す.

世紀	満開の記述・近現代 の記録(タイプ1)	花見・花宴など (タイプ2)	花の枝の進上 (タイプ3)	和歌の題 (タイプ4)	フジの満開日 による推定値	ヤマブキの満開 日による推定値	データ総数
9	0	10	1	3	0	0	14
10	1	22	1	3	5	0	32
11	3	21	1	7	1	0	33
12	5	46	1	2	1	0	55
13	11	34	1	11	0	2	59
14	5	45	0	3	2	1	56
15	21	61	1	4	1	0	88
16	11	60	20	2	1	0	94
17	27	59	2	2	0	0	90
18	43	51	2	0	0	0	96
19	52	44	0	2	0	0	98
20	97	0	0	0	0	0	97
21	10	0	0	0	0	0	10
合計	286	453	30	39	11	3	822

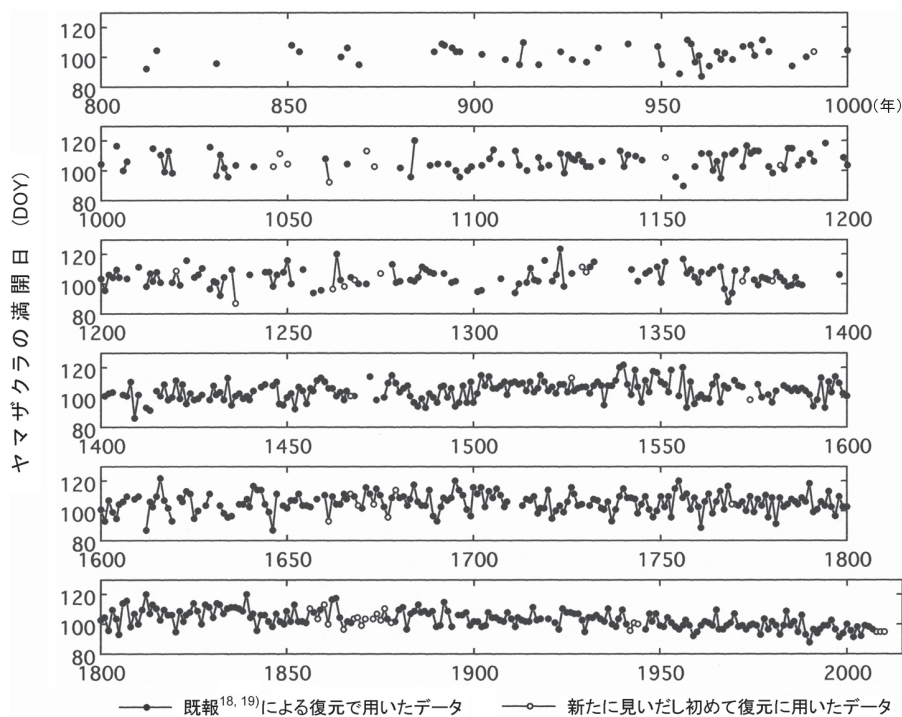


図1 本研究でまとめたヤマザクラの満開日の推移.

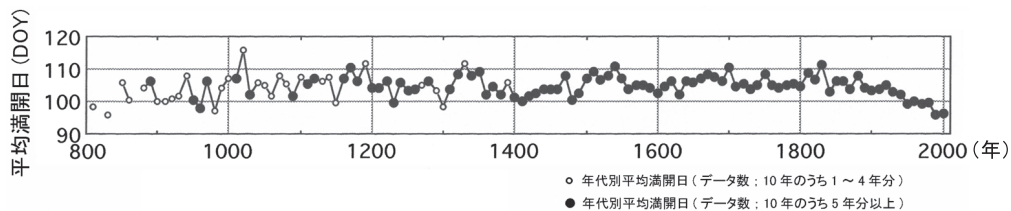


図2 ヤマザクラの満開日の年代別(10年)ブロック平均値の推移.

代である。また逆に, DOY 100(4月10日)前後まで早くなった時代は, 950~960年代, 1030年代, 1090年代, 1400~1410年代, 1480年代, そして1960年代から現在までである。

また, 数十から数百年のスケールで続いた満開日の長期的なトレンドも, この図2からいくつかうかがえる。10世紀から12世紀にかけての緩やかに遅くなる傾向や, 西暦1400年から1550年代にかけ

ての緩やかに遅くなる傾向は明瞭に認められる。一方, 1820年代以降の最近170年間は, 現在までほぼ一貫して満開日が早くなる傾向が続いている。図2を通して見ると, 過半数の年で満開日が判明した年代(●)の平均満開日の推移は, 5日以上「ジャンプ」を見せることは稀で, むしろ長期にわたるトレンドを伴った, 緩やかな変化を示すようである。

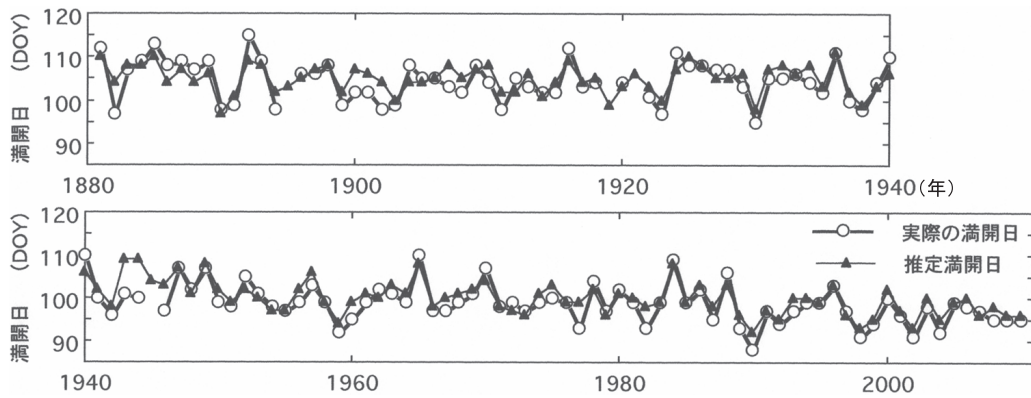


図3 温度変換日数法を用いたヤマザクラの満開日の推定結果。

3. 満開日と気温との関係づけ

本研究でも、既報^{17) - 19)}と同様に、温度変換日数法の応用によって、満開日から3月平均気温を推定した。気温の推定に際しての温度変換日数法の応用手順についてはAono and Kazui¹⁸⁾が最も詳しく述べているので、ここでは概略だけを説明する。

解析の流れとしては、まず満開日の推定を通して京都地方気象台における気温との関係づけ(キャリブレーション)を行い、モデルに使う変数を確定させ、続いて満開日から気温を推定できるようにモデルを逆に適用する。本研究の計算で用いる温度変換日数²¹⁾とは、生物の生長・生育・増殖の速度の温度条件による変化を、標準温度(本研究では15℃)を基準にした相対値として表したものである。温度変換日数は、日平均気温から指数関数を使って計算される。温度変換日数法では、気温から計算された毎日の値をある起算日から積算し、その値が、実際の満開日までに要する積算値の平均に達した日を満開の推定日とする。この方法は各種果樹の開花^{22), 23)}、花木の開花^{24) - 28)}、温帯落葉樹の開芽²⁹⁾などの推定や予測に広く利用されている。

この方法では温度変換日数の積算を始める起算日と、気温と生育速度との関係を左右する温度特性値 E_a (kJ mol^{-1})の2つの変数の適切な値を求める必要がある。起算日と E_a を選ぶための解析を行い、満開日と気温とを関係づけるための期間をキャリブレーション期間と呼ぶ。Aono and Kazui¹⁸⁾は、都市温暖化の影響がほとんどないと見られる1911~1940年をキャリブレーション期間とし、起算日をDOY 42(2月11日)、 E_a を 56 kJ mol^{-1} とする組み合わせを用いた場合に、RMSEで2.5日と最小の誤差で満開日を推定できることを明らかにした(図3)。全期間(1881~2010年)の推定満開日のRMSEは2.8日と推定精度が良好な上、時間の経過に伴う推定誤差の出方の系統的变化も認めなかった。このことは、都市昇温のない近代気象観測開始前においてもこの方法が適用可能であることに加え、嵐山と京都地方気象台ではほぼ同程度の都市温暖化の影響を受けていること

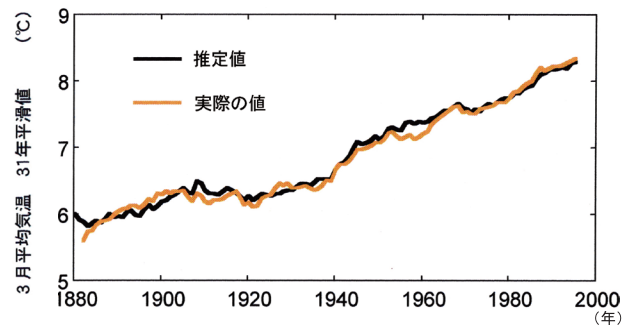


図4 3月平均気温の推定値と実際の値との比較。双方とも31年区間回帰曲線を用いて平滑化して示した。

の2つを示したものと言える。

こうしたキャリブレーション結果を踏まえながら、温度変換日数法を気温の推定へと逆に応用した。まず1911~1940年の日平均気温の平滑年平値を計算した。そして、キャリブレーションで見いだした適切な起算日(DOY 42)から、1911~1940年の平年満開日(DOY 104)までについて、日平均気温の平滑年平値を使い、年積算値 DTS_N (日)を計算した。その DTS_N は31.61日と計算された。

ここで毎年の満開日当日において、積算値が DTS_N に達するには一律に何℃の気温偏差を加えれば良いかを年ごとに求めた。こうして求めた年ごとの気温の年平偏差を1911~1940年間の3月平均気温の年平値(6.4℃)に加えた値を、最終的にその年における3月平均気温の推定値とした。

本稿の気温復元では、気候値の長期にわたる推移を明らかにする目的で、気温の推定値を31年区間回帰曲線により平滑化した。図4は同じく平滑化処理をした実際の値の推移との比較である。両者は全期間にわたりほぼ終始重なったまま推移した。このときの推定誤差は、キャリブレーション期間と観測期間全体でいずれも0.1℃と極めて小さかった。以上のように、年平値のような気候値の変化であれば、満開日が多く判明した時代なら極めて高い精度で3月平均気温の推移を推定できることがわかった。

4. 歴史時代における気温の復元推移

図5(下段)に、満開日データを用いて復元した3月平均気温の推移を示す。復元気温には31年区間回帰曲線を使って平滑処理を施した。また、区間回帰の処理の際に求めた95%信頼区間の幅も併せて示した。この信頼区間の幅が狭いほど、その期間の満開日の判明率が区間内で高い、また満開日の年々変動が小さいことを表し、復元気温の信頼性が高いことを示唆する。今回の史料調査によるデータの追加によって、これまで不明だった1030年代から1060年代までの気温推移が初めて明らかになり、9世紀末以降、現代まで連続した復元値を得るに至った。

解析期間全体の中で満開に関するデータが多く信頼区間幅が相対的に狭いのは15世紀以降である。この時代は小氷期と呼ばれる時代全体(1400~1850年)を含み、この期間における本研究の復元気温も全般的に低めに推移した。特に3月の気温が5℃と、京都としてはとりわけ寒冷な時期が150~200年に一度の頻度で繰り返しやってきた。こうした低温な状態の出現した時代は、アジア地域のほかの古気候復元結果^{30), 31)}で示された時期とおおむね符合した。

推定気温に見られた寒冷期の出現時期を考察するために、図5の上段にSolanki *et al.*³²⁾による太陽黒点数の復元推移を並べた。太陽黒点数が少ないほど太陽活動が不活発なことを表す。とりわけ黒点が少なかった期間を一般的に太陽黒点(または太陽活動)の極小期と呼ぶ。図5に入れた陰影は、最近1200年間に於いて認められる主要な5つの極小期を示している。これらは古い順に、オールト極小期(1010~1050年)、ウォルフ極小期(1280~1340年)、シュペーラー極小期(1420~1570年)、マウンダー極小期(1645~1715年)、そしてドルトン極小期(1790~1820年)と呼ばれる。

ここで、復元気温がとりわけ低かった時期について詳しく考察する。1320~1350年代、1510~1550

年代、1660~1700年代、1810~1830年代の4つの時代では、復元気温が明らかに5℃前後まで低下した。これらの4つの低温期はそれぞれ、図5の陰影部分、すなわち太陽黒点の極小期のうち、オールト極小期を除いた4つの極小期に近い時期に現れたことがわかる。Waple *et al.*³³⁾は、日本を含む東アジアから東南アジア、オセアニア北部にかけての地域では、全般に太陽活動の盛衰と気温変化との間に正の強い相関があることを示した。太陽活動の盛衰が気候変動にもたらす影響のプロセスについては、本稿の最後で触れるようにいくつかの考えや説があり未解明の部分も多いが、今回見られた極小期における気温低下も、一般に見られる太陽活動と同期した気候変化を示したと思われる。また、これら4つの低温期それぞれの中で最も気温の低下した時期はいずれも、対応する極小期の後半から直後にあたることもわかった。Waple *et al.*³³⁾は、太陽活動に対して14年、またShindell *et al.*³⁴⁾は20年の気候応答の遅れを気温変化に考慮した方が、太陽活動-東アジアにおける気温間の相関が高くなることを示した。また他にもWang and Zhang³⁵⁾はこの遅れが13年であることをチベットに生育した樹木の年輪解析から突き止めている。本研究の極小期における気温降下の遅れも、太陽活動に対するこうした気候応答の遅れの影響を反映した可能性が高い。

なお、本研究で新たに判明した11世紀の気温推移にも、5℃台までの低下があることがわかった。この時期はオールト極小期の初めの頃(1010年代)にあたるが、この時代の満開日データはまだ少ない。この時期の低温がオールト極小期における弱い太陽活動に同期して現れたかについては、今後のデータのさらなる充実を待って結論づける必要があると考えている。

続いて、推定気温が顕著に高かった時代について考察する。都市昇温の影響が著しい20世紀後半を除くと、復元気温が7℃を上回るまで上昇した時期は、900~970年代(最高値は7.6℃)と、1390~1420

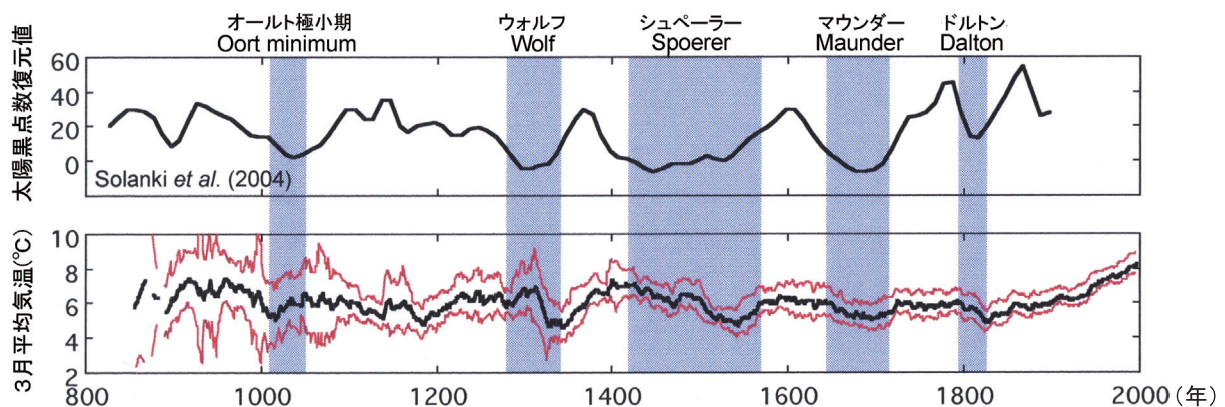


図5 (上段)Solanki *et al.*³²⁾による太陽黒点数の復元推移。(下段)京都における3月平均気温の復元推移(31年区間回帰曲線による平滑値)。
上下の2本の細線は、平滑処理時に計算した95%信頼区間の限界値。

年代(最高値は7.4℃)の2つである。このうち前者、すなわち10世紀については、たとえばKitagawa and Matsumoto³⁶⁾が、屋久スギの材の安定同位体比推移から、西洋史観で言う中世(一般に5~15世紀)における気温のピークの1つが存在したことを明らかにしている。また、最近ではMiyahara *et al.*³⁷⁾が同様に屋久スギの材を調査・解析し、10世紀前半は太陽黒点の増減の周期が約9年と短く、太陽活動が極めて活発な時代であったことを示した。本研究で明らかとなった10世紀の温暖な気温の復元推移には、一連の屋久スギを用いた研究結果と符合する点が多い。また、アジア地域では他にも、この時代の暖かさを示す復元結果が複数ある^{38), 39)}。さらに、Loehle and McCulloch⁴⁰⁾がまとめた世界各地の種々の代替データによる気温の復元値の平均的推移も、過去2000年間のうち7~10世紀の気温が総じて他の時代よりも高いことを示している。本研究の結果も、活発な太陽活動のために10世紀のアジア地域を含む広い地域で、温暖な気候が形成されていたことを示すものと考えている。

この時期を含む8世紀から11世紀にかけての東アジアにおけるさまざまな気候復元の結果を、もう少し詳しく見る。それによると、750年頃から始まった温暖化傾向の中、850~900年頃に短くもかなり厳しい寒冷期が訪れ、その後、10世紀に入ってから再び温暖な状態に至ったと見られる⁴¹⁾。本研究による復元結果でも890年代から910年代にかけての気温上昇は現れているが、850~870年頃の気温低下の始まりについては、この時代の満開日データの少なさもあって検出には至らなかった。全般に暖かかった7~12世紀でも、短い寒冷期が繰り返し発生したことはさまざまな研究により判明しつつある⁴¹⁾。前に述べた1010年頃の寒冷期の詳細も含め、9~12世紀の温暖な時代における気候変動をもう少し詳しく知るには、この時代のさらなるデータの充実が欠かせないと言える。

5. 19世紀以降の気温推移と都市温暖化

続いて、急速な昇温が今日まで続いている最近200年間の気温推移について考察する。この昇温が

始まった1826年はドルトン極小期の直後であり当時の復元気温は4.9℃であった。以後、今日までの上昇の幅は3.4℃に達している(図6の黒い線)。この上昇はAono and Kazui¹⁸⁾が述べたように、①小氷期の終了以降、広いスケールで生じた気温上昇に起因した分と、②京都における都市温暖化に起因した分の、2つの原因による昇温が混じったものと見られる。古気候の復元結果を考察するには、現在の環境との比較によるのがわかりやすい。しかしながら、ローカルな②の都市昇温の影響を現在の気温からなるべく除いたものを比較の基準にしなければ、最近までを含めて長期にわたって広域で起きた気候変動を正しく評価したことにはならない。

気温の復元値から都市昇温による影響(以後、都市効果と呼ぶ)を除く目的で、ここでは既報^{18), 19)}にならない、小元・鯉谷⁴²⁾による都市効果の計算方法を用いることにした。この方法では、都市観測所(この場合は京都)と、市街化の影響を受けていない対比観測所の2地点の累年気温データを用いる。手順としては、まず両地点で観測が始まった最初の30年間における気温差(都市昇温前にもとから存在した気候差)と、両地点それぞれにおける30年平均値からの年々変動の大きさの比を求める。この観測期間の最初の30年間以降における都市の影響を除いた仮想の気温は、対比観測所の気温を都市観測所と同じ大きさの年々変動を示すように補正し、そこに両地点間にもとから存在する気候差を加えることで計算される。この都市の影響を除いた仮想の気温を実際の観測値から差し引いた値が都市効果となる。今回もまずは既報^{18), 19)}と同様に、小元・鯉谷⁴²⁾に準じて対比観測所を滋賀県の彦根地方気象台と設定して都市効果を計算し、これを気温の復元値から差し引いて復元気温の自然値を計算した(図6)。1826年から現在までの復元気温の昇温(黒の線、3.4℃)に比べ、復元気温の自然値(水色)の昇温は2.3℃と小さかった。既報^{18), 19)}ではこの値が、都市昇温とは関係なく広い地域スケールで生じた昇温量と、ひとまず考えられた。

ところで、この計算方法が構築された1970年代当時には都市化の影響が少ないと見られた彦根でも、昨今は観測点の周囲の市街化が進み、やはり都

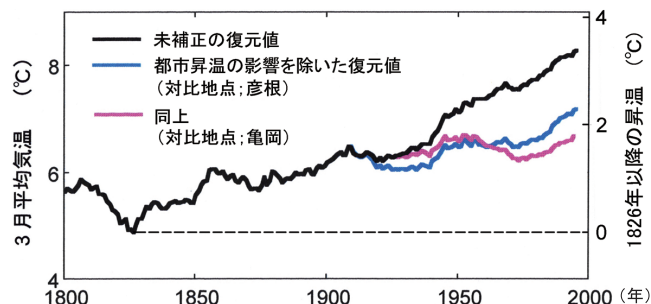


図6 最近200年間の気温の復元推移と、対比地点として彦根と亀岡とをそれぞれ用いて計算された復元気温の自然値。

市昇温の影響が懸念される。また、彦根市は京都市から 50 km 程度離れており、対比観測所とするには観測点の立地と気候推移の類似性との 2 つの点から見て少なからず問題があるように考えられた。そこで、より適切な対比観測所として、京都市の中心部からの距離が 15 km 程度と近い上に、観測地点が市街地の外れにある京都府亀岡市の亀岡観測所(旧・区内観測所であり、その廃止後も京都府農業総合研究所が継続観測)を採用し、京都市の都市効果を再評価した。図 6 の紫色の線は、亀岡を対比観測点として再評価した復元気温の自然値の推移である。直近の復元気温の自然値は 6.7℃であった。計算に利用した対比観測点の京都市からの距離と周囲の環境とを考え合わせると、亀岡の気温を用いて算出した復元気温の自然値の方が、より確かである可能性が高い。

こうして新しく求めた現在の京都における復元気温の自然値をもとに、気温の復元推移を考察してみる。小氷期からの気候回復過程にあった過去 170 年間(1820 年代～現在)における都市効果を除いた昇温は 1.8℃と評価される。これは、19 世紀初めの近畿地方における冬季の気温の平年値が現在よりも 2℃程度低かった可能性を指摘した山本⁴³⁾の研究結果と符合する。一方、直近の復元気温の自然値である 6.7℃を歴史時代の復元気温の推移と比較すると、たとえば、太陽活動が極めて活発と見られる 10 世紀の復元気温(最高値は 7.6℃)は、ほとんどの期間にわたって現在よりも高かったと言えることができる。

過去の気温変化を現代の都市の気温をベースに考察するには、都市昇温の影響を適切に除く必要がある。しかしながら、昨今では中小の地方都市でも市街化や熱環境の改変が進み、対比観測所の適切な選定が困難になってきている。こうした事情から近年は、都市昇温が気温に及ぼす影響を正確に定量化するのが難しくなりつつある。これと同じ問題は広域で平均化された気温のモニタリングでも起きうる。気温の地域平均値の算出に用いる各地点のデータから都市昇温によるバイアスを適切に除去するか、都市化の影響を受けた地点のデータを計算から除くかしないと、広域のスケールで起きた気温変化を正しく評価できなくなる。広域の気候変化の平均値に及ぼす都市昇温の影響については、過去に Willmott *et al.*⁴⁴⁾が明らかにしているように、慎重な取扱いやデータ処理を必要とすると言えよう。

6. おわりに

植物季節を使った気温復元の最大の特徴は、復元される気温が、はっきりとした月別・季節別平均値として得られるところにある。堆積物などの代替データを用いた古気候の復元研究では、年平均気温な

どを推定することが多いが、植物季節を用いる方法では気温が植物の特定の生育ステージに影響する季節の気温しか復元できない。結果的に、そうした月を絞り込む必要があるが、逆にこれが特定の季節や月の気温推移を復元できる特徴へと繋がる。

3 月の気温の推移は冬季のそれに比較的近い傾向がある。太陽活動の盛衰は、全放射量の増減だけでなく、たとえば最大で 8% 程度も変化する紫外域の放射が影響して、成層圏を含めた大気の力学過程、季節風の吹き方や強さを変化させるとされている^{45) - 47)}。この一連の過程が気候全般に及ぼす影響は、北半球が冬季の時期に現れやすく、また、この過程のシグナルは大陸の内陸部よりも海洋周辺で、長期間にわたって持続する傾向もあるとされる。さらに近年は、太陽系外からの宇宙線による大気分子の電離がもたらす雲核の生成に、太陽活動の盛衰に伴う磁場の強さの変化が影響して、気候変動をもたらすという仮説も提唱され⁴⁸⁾、検証が急がれている。

もし、サクラの開花とは別に、夏季から秋季にかけて起きる植物季節のデータを収集し、それによる気候復元を行えば、暖候季と寒候季の気温復元値をそれぞれ別個に太陽周期などと比較可能となる。その結果はたとえば、復元値の変動の大きさや、太陽活動の盛衰に対する応答の遅れの違いを通して、どのようなプロセスで、どの季節の気候に太陽活動が影響しているかを解明するのに資することもできよう。目下、他の季節に関するデータを史料から収集中であり、いずれは夏季や秋季の気温推移も明らかにしたいと考えている。

謝 辞

本稿は、科学研究費(基盤研究(C)、課題番号 23501247、古記録における天気ならびに植物季節的記述を用いた気候復元手法の確立)の助成を受けた研究成果も一部含めて、まとめたものである。記してここに謝意を表す。

引用文献

- 1) Margary, I. D. (1926) The Marsham phenological record in Norfolk, 1736-1925. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 22, 27-54.
- 2) Lauscher, A. and F. Lauscher (1981) Vom Einfluß der Temperatur auf die Belaubung der Roßkastanie nach den Beobachtungen in Genf seit 1808. *Wetter und Leben*, 33, 103-112.
- 3) Sparks, T. H. and P. D. Carey (1995) The responses of species to climate over two centuries: An analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology*, 83, 321-329.
- 4) Ahas R. (1999) Long-term phyto-, ornitho- and ichthy-

- ophenological time series analysis in Estonia. *International Journal of Biometeorology*, 42, 119-123.
- 5) Defila, C. and B. Clot (2001) Phytophenological trends in Switzerland. *International Journal of Biometeorology*, 45, 203-207.
- 6) 吉野正敏 (2007) 気候学の歴史 古代から現代まで. 古今書院.
- 7) 中原孫吉 (1942) 本邦に於ける植物季節顕象に就いて 本邦植物季節の研究 其の 1. 産業気象調査報告, 10, 101-118.
- 8) 中原孫吉 (1944) 植物季節線の推移状態に就いて 本邦植物季節の研究 (其の 2). 農業気象, 1, 153-158.
- 9) 大後美保・鈴木雄次 (1947) 日本生物季節論 (産業気象叢書 I). 北隆館.
- 10) 河村 武 (1982) 季節現象の観測と気候の解明への応用. 天気, 29, 559-574.
- 11) Chuine, I., P. Yiou, N. Viovy, B. Seguin, V. Daux and E. Le Roy Ladurie (2004) Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 432, 289-290.
- 12) Garnier, E., V. Daux, P. Yiou and I. G. de Cortázar-Atauri (2011) Grapevine harvest dates in Besançon (France) between 1525 and 1847: Social outcomes or climatic evidence? *Climatic Change*, 104, 703-727.
- 13) 田口龍雄 (1939) 日本の歴史時代の気候に就いて (二). 海と空, 19, 217-227.
- 14) 荒川秀俊 (1955) 京都における観桜の記録から推定される気候の変動. 地学雑誌, 64, 31-32.
- 15) Arakawa, H. (1956) Climatic changes in revealed by the blooming dates of the cherry blossoms at Kyoto. *Journal of Meteorology*, 13, 599-600.
- 16) 関口 武 (1969) 京都の桜花史料の気候学的意義. 東京教育大学地理学研究報告, 13, 175-190.
- 17) 青野靖之・小元敬男 (1994) サクラの開花史料による 11 世紀以降の京都の気温の推定. 農業気象, 49, 263-272.
- 18) Aono, Y. and K. Kazui (2008) Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. *International Journal of Climatology*, 28, 905-914.
- 19) Aono, Y. and S. Saito (2010) Clarifying springtime temperature reconstructions of the medieval period by gap-filling the cherry blossom phenological data series at Kyoto, Japan. *International Journal of Biometeorology*, 54, 211-219.
- 20) 青野靖之 (2011) 史料による春の開花記録の特徴と気候復元への応用の有効性. 時間学研究, 4, 17-29.
- 21) 金野隆光・杉原 進 (1986) 土壌生物活性への温度影響の指標化と土壌有機物分解への応用. 農業環境技術研究所報告, 1, 51-68.
- 22) 小野祐幸・金野隆光 (1990) 温度変換日数法による果樹の生育予測について. 中国・四国の農業気象, 3, 87-90.
- 23) Honjo, H., R. Fukui, Y. Aono and T. Sugiura (2006) The DTS accumulation model for predicting the flowering date of Japanese pear tree in Japan. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 707, 151-158.
- 24) 青野靖之・小元敬男 (1990) チルユニットを用いた温度変換日数によるソメイヨシノの開花日の推定. 農業気象, 45, 243-249.
- 25) 青野靖之・小元敬男 (1992) ヤマツツジ・フジ・アジサイの開花日の推定. 農業気象, 47, 233-240.
- 26) 青野靖之・佐藤和美 (1996) 休眠解除過程を考慮した西日本におけるウメの開花日の推定. 農業気象, 52, 125-134.
- 27) 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, 165-177.
- 28) 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, 283-296.
- 29) 藤本征司 (2007) 広葉樹 29 種の 10 年間の開芽フェノロジー観測に基づく開芽日予測法の検討. 日本林学会誌, 89, 253-261.
- 30) Thompson, L. G., E. Mosley-Thompson, M. E. Davis, P. N. Lin, K. Henderson and T. A. Mashiotta (2003) Tropical glacier and ice core evidence of climate change on annual to millennial time scales. *Climatic Change*, 59, 137-155.
- 31) Ge, Q., J. Zheng, X. Fang, Z. Man, X. Zhang, P. Zhang and W. C. Wang (2003) Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, 13, 933-940.
- 32) Solanki, S. K., I. G. Usoskin, B. Kromer, M. Schüssler and J. Beer (2004) Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431, 1084-1087.
- 33) Waple, A. M., M. E. Mann and R. S. Bradley (2002) Long-term patterns of solar irradiance forcing in model experiments and proxy based surface temperature reconstructions. *Climate Dynamics*, 18, 563-578.
- 34) Shindell, D. T., G. A. Schmidt, M. E. Mann, D. Rind and A. Waple (2001) Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum. *Science*, 294, 2149-2152.
- 35) Wang, X. and Q.-B. Zhang (2011) Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southern Tibet. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1959-1966.
- 36) Kitagawa, H. and E. Matsumoto (1995) Climatic implications of $\delta^{13}\text{C}$ variations in a Japanese cedar

- (Cryptomeria japonica) during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 22, 2155-2158.
- 37) Miyahara, H., Y. Yokoyama and K. Masuda (2008) Possible link between multi-decadal climate cycles and periodic reversals of solar magnetic field polarity. *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 290-295.
- 38) Agnihotri, R., K. Dutta, R. Bhushan and B. L. K. Somayajulu (2002) Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium. *Earth and Planetary Science Letters*, 198, 521-527.
- 39) Sinha, A., K. G. Cannariato, L. D. Stott, H. Cheng, R. L. Edwards, M. G. Yadava, R. Ramesh and I. B. Singh (2007) A 900-year (600 to 1500 A.D.) record of the Indian summer monsoon precipitation from the core monsoon zone of India. *Geophysical Research Letters*, 34, doi: 10.1029/2007GL030431.
- 40) Loehle, C. and J. H. McCulloch (2008) A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies. *Energy and Environment*, 19, 93-100.
- 41) 吉野正敏 (2011) 古代日本の気候と人びと. 学生社.
- 42) 小元敬男・鰐谷 憲 (1979) 気象官署のデータからの都市気候効果の消去の試み. 農業気象, 35, 93-96.
- 43) 山本武夫 (1967) 日本における気候変動の概観. 気象研究ノート, 91, 336-343.
- 44) Willmott, C. J., S. M. Robeson and J. J. Feddema (1991) Influence of spatially variable instrument networks on climatic averages. *Geophysical Research Letters*, 18, 2249-2251.
- 45) Kodera, K. and Y. Kuroda (2002) Dynamical response to the solar cycle. *Journal of Geophysical Research D: Atmosphere*, 107 (24), 4749, doi: 10.1029/2002JD002224.
- 46) 小寺邦彦 (2005) 力学過程を通じた百年スケール太陽活動の気候への影響. 月刊地球, 27, 700-705.
- 47) Kodera, K. (2006) The role of dynamics in solar forcing. *Space Science Reviews*, 125, 319-330.
- 48) Svensmark, H. and E. Friis-Christensen (1997) Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-A missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, 1225-1232.



青野 靖之

Yasuyuki AONO

1962 年, 大阪市生まれ。大阪府立大学農学研究科博士後期課程を 1990 年に単位取得退学し, 同大学助手となる。現職は, 同大学大学院生命環境科学研究科准教授。ソメイヨシノをはじめとする花木・果樹の開花予測法の開発や, 植物季節現象を用いた気候影響評価や古気候復元に関する研究を手がけてきた。博士(農学)。専門は農業気象学。

