

# 植物季節現象に関する気候学的研究

青野靖之

大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科

Climatological studies on plant phenology

Yasuyuki AONO

Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University

## 1. はじめに

このたびは、日本農業気象学会学術賞をいただけることになり、たいへん光栄に思います。受賞にあたって、まずご推薦いただいた文字信貴先生（大阪府立大学名誉教授）、学会賞審査委員をはじめとする関係者の皆様に、この場を借りて心より御礼申し上げます。せっかくのこの機会に、私の植物季節に関する研究について振り返ってみようと思います。

## 2. 植物季節の研究がライフワークになった経緯

私がサクラ（ソメイヨシノ）の開花という植物季節現象を初めての研究対象として決めたのは、私が4年生当時に在籍していた大阪府立大学農学部（農業工学科）の農業気象環境学講座で、当時の講座主任教授であった小元敬男先生に卒業論文のテーマについて相談を持ちかけたときです。1984年の3月初旬頃のことでした。私が「気象が気候条件と植生分布の関係について研究してみたい。」と申し出たところ、小元先生は「じゃあ、サクラの開花でもやらせてみるか。」とおっしゃり、その鶴のひと声が、私のライフワークに繋がりました。さっそく卒業研究のために大阪市内の開花状況の分布について、毎日、自転車で巡回調査をすることになりました。こうした実地調査を通してソメイヨシノの開花までの一般的な生育・形態変化の特徴を覚えました。加えて、例えばソメイヨシノの西側に大きな建物や石垣、築山がある場合には開花が早くなるなど、細かい局所的な条件が開花日を左右することも知りました。こんなに素晴らしい研究テーマや様々な気付きの機会を与えて下さった小元先生に感謝の気持ちでいっぱいです。

大阪市内は平坦であるにもかかわらず、調査で得られた開花日の分布がかなり複雑でした。都市温暖化の影響もあり、市内の開花日の差は最大11日にも達していました（図1）。当時、小元先生は都市温暖化が気温観測値にもたらす影響に「無我夢中」であったので、その影響の広がりをサクラの開花時期を通して明らかにさせたかったのでしょう。これらの調査結果は、私にとっての初めての学会発表—今からちょうど30年前に山形大学農学部（鶴岡市）で行われた、昭和61年度全国大会—で明らかにしました。またこれらは後に、研究論文<sup>1,2)</sup>にもなりました。

## 3. ソメイヨシノの開花日推定モデル

1987年に博士後期課程へ進学してから、小元先生から与えられた次なる命題として『計算方法が系統的に整理され、なおかつ全国で適用可能なソメイヨシノの開花日の推定方法を開発すること』というものが与えられました。それまでのソメイヨシノの開花日の計算方法は、開花前の特定の期間の平均気温を説明変数に使った多項式による計算式、あるいは日平均気温のうち基準温度以上の部分を積算する有効積算気温（growing degree-day）がよく使われていました。ただし、気温条件がソメイヨシノの開花日を左右する時期は地方によって異なるので、多項式による方法では使うべき気温の従属変数や回帰係数が場所によって当然違ってきますし、有効積算気温とて各地で適切とみられる基準温度はバラバラの値となり、とても系統的に整理された推定方法に繋がらそうにありませんでした。

そのとき温度変換日数法と呼ばれる、温度条件に対する生育の速さの非線形の応答をうまくあらわしている積算モデルに出会いました。当時より農業気象環境学講座におられた鱧谷憲先生から指南を受けながら、1987年の大晦日に適切な計算条件を求めるための演算プログラムをやっと完成させ、祈るような気持ちでコンピュータを走らせて年明けの解析終了を待ちました。解析の結果は上々で（図2）、思った以上に良い推定精度に小躍りして喜んだ記憶があります。

温度変換日数法で精度のよい推定結果を得るには、気温に対する生育の応答特性を代表する「温度特性値  $E_a$ 」、温度変換日数の積算を始める「起算日」、開花までに必要となる温度変換日数の「積算値」の3つの感温特性値を適切な値に設定する必要があります。全国のソメイヨシノの開花日の解析を繰り返し行い、温度特性値  $E_a$  の全国共通で使用可能な適切な値を求める作業に着手しました<sup>3,4)</sup>。この結果に基づいて、さらに全国共通で一律の値として設定可能な、開花までに必要となる積算値を決め、それに対応する起算日を地理要素から求めて開花日の計算を可能にした簡便化モデルを構築しました<sup>5,6)</sup>。

あと一つの問題として、九州や太平洋上の離島では、春先の気温だけを使った温度変換日数法による推定精度が悪く、実用にならなくなるという難問が残っていました。これは、冬季が温暖な地域ほど、花芽の自発休眠期と開花に向かう花芽発達期との間が詰まる（あるいは互いに重なる）ことによります。花芽の自発休眠覚醒には5°C周辺の低温に1,000時間程度遭遇することが必要で、暖地の暖冬年には当然自発休眠覚醒は遅れ気味になります。自発休眠期と

<http://agrmet.jp/wordpress/wp-content/uploads/2017-F-1.pdf>

2017年1月10日掲載

Copyright 2017, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

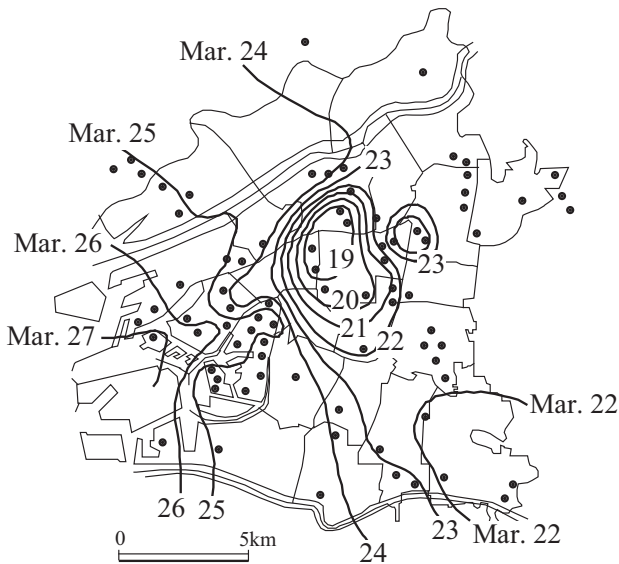


図1. 1989年の大阪市内におけるソメイヨシノの開花日の分布。小元・青野<sup>1)</sup>をもとに描図。

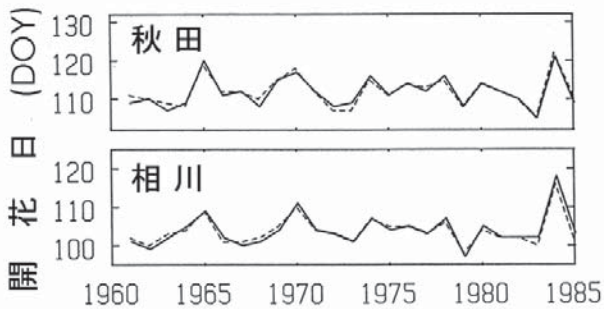


図2. 秋田と相川におけるソメイヨシノの開花日の推定結果<sup>4)</sup>。実線が実際の開花日、破線が推定開花日。

花芽発達期との間が詰まると、冬季の寒・暖が自発休眠覚醒の早・晩を生み、その影響が直接、開花日を前後させるように影響することにもなります。自発休眠覚醒のプロセスをモデルにどのように考慮するかについては、果樹試験場の本條均さんや杉浦俊彦さんなどにいろいろと相談に乗ってもらいました。この時には、休眠覚醒の進捗を知るために使われていた、Richardson *et al.* (1974)の「チルユニット」とよばれる低温の効果に応じて重みを付けた積算時間数を用いて開花に要する積算値を補正することにより、比較的高い推定精度を確保することができました(図3)<sup>4,6)</sup>。

1990年4月に、大阪府立大学農学部 農業気象環境学講座の助手に就任し、さらにこの翌年、おおむね実用になりそうな推定精度(全国のどこでも推定誤差はRMSEで3日以内)を確保した、そこそこ整理された推定モデルとして形になってきたことから、1991年の3月に、それまでの研究成果により博士(農学)の学位が授与されました。

加えてこうした一連の解析を通して提案してきたソメイヨシノの開花日推定の計算方法について、気象庁もこの方法に基づいて、独自にモデルのチューンナップを行っていることが分かった時、何かしら感慨深いものを感じました。気象庁がチルユニットを併用した温度変換日数法を用いて開花予想を行ったのは1996年から2009年までの期間でした(2010年には業務としての開花予想を中止)。1995年以

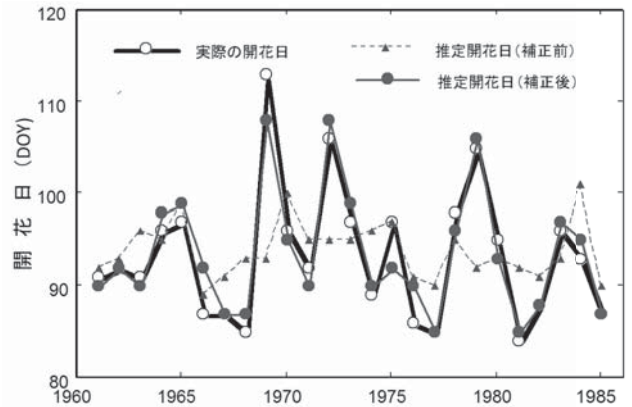


図3. 八丈島におけるソメイヨシノの開花日の推定結果<sup>4)</sup>。チルユニットを用いた補正前後で推定結果を比較。

前の気象庁による開花予想は、気象官署ごとにあった独自の予測式を基に計算された予想開花日に依っていたそうです。温度変換日数法が開花の予測方法として採用されたのは、推定精度が高かったためということもあったでしょうが、むしろ、地方の業務を集約化しようとした当時の気象庁のニーズに合ったことからと思っています。

#### 4. モデル応用への模索

温度変換日数法によるソメイヨシノの開花日の推定モデルが一応の実用化を見たころ、1994年度の改組で研究ユニット名も大気環境学研究室に変わり、研究室主任教授として文字信貴先生が就任され、そうした影響で私自身も人工衛星データを用いた広域熱収支評価や、メソスケールでの風速場の解析、温熱環境指標(体感温度)を用いた熱環境評価など、研究の幅を広げていくことができました。加えて、私自身が植物季節に関する研究も続けていくこともお認め下さいました。当時に、貴重で様々な仕事の経験をさせてもらったこともあって、講義の得意分野や、研究テーマに変な偏りのない現在の自分があると思います。本当に文字先生には感謝しています。

この当時の植物季節に関する研究として温度変換日数法をヤマツツジ、フジ、アジサイ<sup>7)</sup>や野梅性ウメ<sup>8)</sup>、ニホンナシ<sup>9)</sup>の開花日の推定に応用し、それなりの成果をあげていました。しかしながら、実用化されたサクラの開花予測方法を今度は別の研究目的に応用したいと思うようになってきました。開花などの植物季節現象の気候学研究への応用方法としては、主に小気候分布の推定と過去の気候推移の復元の2つがあるとされていました(河村, 1982)。このうち、植物季節現象を小気候分布の推定に用いた研究は、1950年代の一時期によく行われていたようでした。そこで、気温の地理的分布の推定よりはもう一方のテーマ、すなわち気温の長期的な推移の再現にこれまでの研究方法を応用できないものか、と、そのころ考え始めるようになりました。

#### 5. ヤマザクラ満開日を用いた気候復元

京都には数百年前に多くの人が書いた日記が現在も沢山残っています。その中には「満開であった」「花見をした」などといった記述が具体的な日付とともに残されていることが多いのです。この日記の中に出てくる記述を調べてみ

ると、近畿に多かった自生種のヤマザクラの満開日にだいたい近いことがわかりました。ヤマザクラも開花前の気温条件で満開の時期が左右されます。気温から開花時期を推定できるのであれば、逆に開花時期から気温も推定できるはずですが。この種のデータは戦前から少しずつ収集、整理が行われ、京都については田口 (1939) や関口 (1969) などの手により、百数十年分程度の満開日がすでに判明していました。しかし、まだ気温への読み替えは行われておらず、満開日のデータも先人の論文に載せられたまま眠っていました。

そこで一念発起し、自分自身で古記録 (古日記類) を調べ、京都におけるヤマザクラの満開の状態や花見・花宴に関する記述を収集・整理して、春の気温の過去約 1,000 年間にわたる長期的な変化を得ようと考え、少しずつ文献史料を調べ始めました。とはいえ、自分自身は高校時代から古文が苦手だったのに加えて、最初はどのように文献史料にたどり着けば良いかすら分からない、全くの手さぐり状態からの出発でした。歴史上の有名人による日記は刊本化 (活字本に) されているので、手始めにこれらを調べ、一旦、解析結果を 1993 ~ 94 年に「農業気象」誌でまとめました<sup>10, 11)</sup>。しかしながら、史料からのデータがまだまだ少なく、復元気温も途切れがちで、気温の復元結果としては不十分なものでした。

時が流れ、ネット環境の発達で図書館・史料館の蔵書検索が容易になり、また自身が未刊本化の (活字化されていない) 文書を読めるようになったこと、加えてこの研究テーマに興味を持った卒論生の助けもあって、2005 年度に調査・研究を再開しました。満開日データの空白が多い時代については、フジやヤマブキなど春に開花する別の植物の記録からヤマザクラの満開日を推定する方法も採用しました。またどうしても埋まらないデータの空白年については無名の市井の人々による古日記の原本を調べたりもしました。一連の史料調査によって、京都については最終的に過去 820 年分余りのヤマザクラ満開日のデータを得るに至り、なんとか西暦 890 年以降で連続した春季 (3 月) の平均気温の推移を明らかにすることができました。その結果を見ると、明らかにいくつかの寒冷な時代や温暖な時代が存在するように見えました。

この一連の結果をかねてから注視していた気象研究所の小寺邦彦さんや、東京大学宇宙線研究所の宮原ひろ子さん

が、満開日による気温復元値が太陽活動と同期しながら変動していることをご指摘くださり、太陽活動の影響を受けている可能性も含めて海外誌に投稿論文としてまとめるよう、私の背中を押してくださいました。過去 1,200 年間に、太陽は幾度か著しく活動を低下させた極小期 (grand solar minima) を迎えましたが、そのうち、鎌倉時代末のウォルフ極小期、戦国時代のシュペラー極小期、江戸時代前期のマウンダー極小期、同じく後期のドルトン極小期のいずれも後半あるいは直後に、京都の気温が現在よりも 3°C 程度低くなるような、極めて寒冷な時代が到来していたことが明らかになりました (図 4)。一方、いわゆる「中世温暖期」にあたる、平安時代前期の 10 世紀前半の時代は現在よりも春季気温が高かったと考えられること、また最近約 200 年間の京都の気温上昇 3.4°C のうち、都市温暖化起源によるものが 1.6°C、自然変動 (広範囲でみられた気候回復) による分が 1.8°C であることもわかりました<sup>12-16)</sup>。

## 6. 気候変動のメカニズム解明への一助になれば

一連の復元結果では、京都の気温推移は太陽活動の推移に対して十数年から数十年も遅れているように見えました。太陽物理学や宇宙気候学と呼ばれる分野の先生方は、こうした結果にかなり興味を持っておられるようでした。そうした方々からは、日本自体が気候変化と太陽活動との間に強い正の相関が認められる地域であること (Waple *et al.*, 2002)、また、太陽の気候への影響はさまざまなプロセスを経ていると思われるので季節によってこの遅れが異なる可能性もあることなどをアドバイスして下さいました。好都合なことに、植物季節現象はある特定の季節の気象条件の影響をうけて年次変動するので、逆に気温復元のデータソースとして応用する場合、年平均気温の復元は不可能であっても、ある特定季節の気温の長期変化やその気候応答の遅れを復元・解析するのには役立つはずです。

そこで同じく京都におけるカエデ類の紅葉時期から秋季 (10 月) の気温を復元しました<sup>17)</sup>。カエデ類の紅葉はサクラの開花と違って気温との関係がそれほど密接ではないので、秋季気温への読み替えには苦労しましたが、それでも復元された秋の気温は、シュペラー極小期やドルトン極小期で春の気温と同様に低くなったこと、太陽活動に対する気候応答の遅れが、春の気温に認められるものよりも小さい、あるいはほとんどないとみられるなどの新しい知見

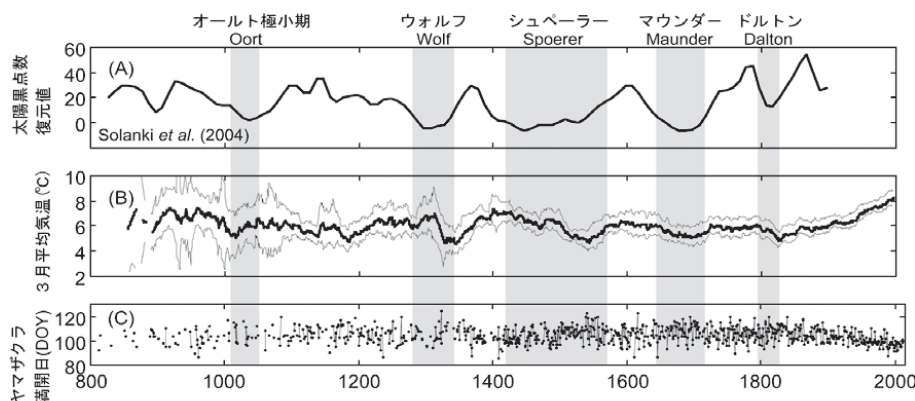


図 4. (A) 太陽黒点数の復元推移 (Solanki *et al.*, 2004), (B) 京都における 3 月平均気温の復元推移 (31 年区間回帰により平滑化)<sup>12, 15)</sup>, (C) 京都で書かれた古記録から明らかになったヤマザクラの満開日の推移<sup>12-15)</sup>。

が得られ、太陽活動に対する気候応答の遅れには季節差のあることがわかりました。目下、古記録に記載された天気の記事による夏季の気温の復元と、その応答の遅れの検出を試みっていますが、気候応答の季節差・時代による変化は思った以上に複雑で、なかなか一筋縄ではいかないようです。一連の研究で明らかとなってきている気温の復元結果や気候応答に関する知見が、今後、気候の自然変動のメカニズム解明に繋がっていけば本望に思っています。

## 7. おわりに

度重なる改組の末に研究ユニット名が「生態気象学研究グループ」となっている2016年現在、冬の気温がもたらす休眠覚醒時期の年次変化を可能な限り簡単に考慮できるソメイヨシノの開花日の簡便な推定方法を、学生と二人三脚で作っています。学生時代の私を知る同期生などの中には「まだサクラを研究しているのか？」とあきれられる向きもあります。しかし『大阪市内でサクラの開花日の分布を調べてみなさい』……30年以上も前に小元先生からこの最初の課題をいただいて以来、今もって植物季節の研究をしている私は、ある意味、本当に幸せな研究生生活を送っているのかもしれない。

最後に、本稿にこれまで登場した方々をはじめ、私の研究を支えて下さった皆様に改めて御礼申し上げます。また、私が今日まで植物季節に関する研究成果を積み上げてこられたのは、私が主担となった卒論生・大学院生たちのお蔭もあってのことと考えています。とくに、複雑な野梅性ウメの開花日推定モデルづくりに力を発揮した佐藤和美さん、休眠覚醒を考慮したソメイヨシノの開花日モデルの構築に粘り強く付き合っていたいただいた守屋千晶さん、難しい近世の史料や近代の新聞の調査に勤しみヤマザクラ満開日と気温との関係づけを成功させた数井敬子さん、カエデ類の紅葉日のデータを根気強く史料から探し出し膨大なデータセットを完成させた谷彩夏さんには、こちらが教えているつもりでも、いろいろと教わることも多かったように思います。彼女たち教え子にも、この場にて心から感謝します。

なお、本稿で記した方々の氏名、所属は、それぞれお世話いただいた当時のものです。

## 引用文献

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.

Richardson EA, Seeley SD, Walker DR, 1974: A model for estimating the completion of rest for 'Redhaven' and 'Elberta' peach trees. *Hortscience* **9**, 331-332.

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.

Solanki SK, Usoskin IG, Kromer B, Schüssler M, Beer J, 2004: Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature* **431**, 1084-1087.

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.

Waple AM, Mann ME, Bradley RS, 2002: Long-term patterns of solar irradiance forcing in model experiments and proxy based

surface temperature reconstructions. *Climate Dynamics* **18**, 563-578.

## 関連論文

- 1) 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**, 123-129.
- 2) Omoto Y, Aono Y, 1990/91: Effect of urban warming on blooming of *Prunus yedoensis*. *Energy and Buildings* **15-16**, 205-212.
- 3) 小元敬男・青野靖之, 1989: 速度論的手法によるソメイヨシノの開花日の推定. *農業気象* **45**, 25-31.
- 4) 青野靖之・小元敬男, 1990a: 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.
- 5) 青野靖之・小元敬男, 1990b: 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Honjo H, Fukui R, Aono Y, Sugiura T, 2006: The DTS accumulation model for predicting the flowering date of Japanese pear tree in Japan. *Acta Horticulturae (ISHS)* **707**, 151-158.
- 10) Aono Y, Omoto Y, 1993: Variation in the March mean temperature deduced from cherry blossom in Kyoto since the 14th century. *Journal of Agricultural Meteorology* **48**, 635-638.
- 11) 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.
- 12) Aono Y, Kazui K, 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.
- 13) Aono Y, Saito S, 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.
- 14) 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.
- 15) 青野靖之, 2012: 植物季節の長期変化と気候変化. *地球環境* **17**, 21-29.
- 16) 青野靖之, 2013: 京都の桜満開日記録による歴史時代の気候復元. *歴史地理学* **267**, 48-52.
- 17) 青野靖之・谷 彩夏, 2014: 古記録中のカエデの紅葉記録から復元した京都の秋季気温の推移. *生物と気象* **14**, 18-28.