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

青野靖之^{*,†}・村上なつき^{**}

(^{*} 大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科 〒599-8531 堺市中区学園町 1-1
^{**} 現在の所属：枚方市役所)

A simplified method to estimate cherry blossom phenology
considering temperature during endodormancy process

Yasuyuki AONO^{*,†} and Natsuki MURAKAMI^{**}

(^{*} Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University.
Gakuen-cho 1-1, Naka ward, Sakai, Osaka 599-8531, Japan
^{**} Hirakata city government.)

Abstract

We constructed a simplified method to estimate first flowering dates of cherry tree (*Prunus × yedoensis*), considering temperature conditions in endodormancy process. We adopted the DTS method, which is an accumulation model of forcing effect of temperatures during developing process, as an estimation model of cherry blossom phenology in this study. In our previous studies, DTS method with fixed (pre-determined) starting dates for each site showed high accuracies for cold regions, whereas low accuracies for warm regions. Such accuracy drop was attributed to the volatility in endodormancy completion in warmer region of Japan, affected by inter-annual variation in chilling temperature during winter season. In order to reduce such error, it had been necessary to calculate chilling hours from hourly temperature data and evaluate the progress in endodormancy releasing process, with complicated conventional procedures. In our new model, an annual discrepancy in starting date of forcing effect from the pre-determined dates, calculated from a simplified procedure in our previous model, were calculated as the product of the correction coefficient, C_i , for each year and a winter temperature normal value above a threshold of chilling effect for endodormancy release, $(T_{DJ} - 1.5)$, for each site. Annual correlation coefficient C_i was calculated from averaged winter temperatures at 7 secular observatories in warm region in Japan. Estimated first flowering dates with and without correction of starting dates were compared each other. The estimations by new method kept under about 3.2 days of RMSE. The introduction of new method also reduced RMSE within 3 days into approximately half of stations, applied to verification of new method with relatively long (50-year) period.

Key words: DTS-method, Endodormancy completion process, First flowering date, Simplified model, *Prunus × yedoensis*
キーワード：温度変換日数法，開花日，休眠覚醒過程，ソメイヨシノ，モデルの簡便化

1. はじめに

植物の開花や萌芽といった植物季節現象は環境の季節変化や農業生産などにも関係することから、季節の移ろいや生物相の変化を知る方法として、日本では古くから人々の生活の中に取り入れられてきた（吉野，2012；塚原・林，2012）。今日においても、開花を始めとする植物季節現象は、観光的な面や気候変動の影響評価の研究面など、様々な場面において注目される。植物の開花を重要な観光資源としている地域では、植物の開花時期の変動が地域の関連産業にも影響することから、たとえば奈良県吉野町のヤマザクラ（飯田ら，2013）や静岡県河津町のカワヅザクラ（村上ら，2006），また埼玉県日高市のヒガンバナ（Inoue and Nagai, 2015）について、気候条件に起因する開花期の変動がもたらす影響の評価が試みられている。

サクラ，とりわけソメイヨシノの開花は今日の日本人に

とって春の到来を示す象徴的な植物季節現象といえる。ソメイヨシノが全国的に広がっていることやその遺伝的変異の小ささ，開花データの豊富さに加え，春先における開花予測の注目度の高さも相まって，開花予測や気候影響評価に関する既往の研究が極めて多い。開花時期の予測・推定については，回帰モデル（坂井・河原，1952；伏木測候所，1953；熊野，1957）や，有効積算気温モデル（Lindsey, 1963；江幡・石川，1987）が従来から使われてきた。

この後，気温に対する非線形の生育応答をあらわした温度変換日数（金野・杉原，1986）が提案され，小元・青野（1989），青野（1991）はこれを用いた積算モデルを構築した。温度変換日数法による当初の推定モデルでは，気温に対する生育応答の特性を表す変数が統一されたものの，積算の起算日の決定に際しては過去の気温と開花のデータを用いた解析が必要なため，それらのない地点における適用は困難であった。このため，青野・守屋（2003）は，地点ごとの起算日の決定に複雑な解析を要さない一般化モデルを提案した。

上記の2つのモデルでは，たとえば東北地方や中央高地，

2016年7月20日 受付，2016年11月30日 受理

[†] Corresponding Author: aono@envi.osakafu-u.ac.jp

DOI: 10.2480/cib.J-17-033

北陸地方よりも南にあたる暖地における冬季の自発休眠覚醒の遅れ／進みがもたらす花芽の発育の進捗の早／晩への影響が考慮されていない。サクラの自発休眠覚醒に必要な $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ (Felker and Robitaille, 1985) の低温に遭遇する機会の多い寒冷地では、自発休眠覚醒後の花芽発達までの間、低温により見かけ上生育が休止する期間があるのに対し、温暖な地域になるほどその期間が短くなったり、極端な場合には自発休眠期と花芽発達期が重なると考えられる。暖地におけるこの現象は、冬季の寒暖により発生した自発休眠解除の遅れ／進み次第で起きる、花芽の発育が再び始まる時期の年次変動を発生させ、これが開花時期をも左右することから、こうした傾向が顕著と思われる西南暖地や太平洋上の島々では休眠期間の気温を考慮しないモデルの場合に誤差が増加する(青野・小元, 1990)。

温帯落葉樹の自発休眠覚醒の時期を推定する方法については、Weinberger (1950), Richardson *et al.* (1974), Erez *et al.* (1979a, b), Albuquerque *et al.* (2008), Matzeniller *et al.* (2014) などにより、さまざまな方法が提案されている。これらの共通点は時別気温を用いた低温の影響の評価ということである。このうち、低温の効果により重みをつけた積算時間数である Richardson *et al.* (1974) の提案したチルユニットを用い、青野・小元 (1990) は開花日までに必要となる積算値を年ごとに補正するプロセスを温度変換日数法に加え、暖地での推定精度を向上させた。また、青野・守屋 (2003) は、このチルユニットによる同様な補正を、一般化された推定モデルにも適用した。しかしこうしたチルユニットを併用する方法では、推定精度の向上をはかるために、時別の気温データが必要になることから、これのない地点ではチルユニットが計算不可能であった。また、チルユニットの起算日が年によって異なる上に時別気温から換算したチルユニットを積算する際の計算の手順自体が複雑なこと、加えて一般化モデルに敢えてチルユニットを用いた補正を適用しても誤差が減少した地点がかなり少なかったことも相まって、これらは、一般化モデルとして高い汎用性と推定精度を有したものとは言えなかった。

観光などを目的とした精度の高い開花予測のニーズに加え、近年、ソメイヨシノについては開花時期に及ぼす気候変動の影響評価が盛んになりつつある(丸岡・伊藤, 2009; Hur *et al.*, 2014)。こうした需要に応える意味でも、複雑な計算処理が簡略化されて任意の地点における開花日の簡単な推定が可能で、なおかつ休眠覚醒の年次変動を簡単に考慮できて高い推定精度が確保された実用的なモデルの開発が望まれる。本研究ではこれを実現する目的で、青野・守屋 (2003) が示した温度変換日数法を用いた休眠解除を考慮しない一般化モデルをベースに、自発休眠期の暖地全般における冬季の平均気温を用いて自発休眠覚醒の年ごとの全般的な遅れ・進みを指標化し、暖冬や厳冬に伴って自発休眠の覚醒が前後することにより発生する暖地特有の推定誤差を簡単に少なくできる方法の構築を試みた。

2. データおよびモデル改善の概要

2.1 解析期間と解析地点

休眠覚醒の過程を考慮した精度の高い一般化モデルを作成するには、温暖な地域に位置する、できるだけ多くの地

点のデータを用いることが望ましい。しかしながら、1997 年以降、2010 年にかけて、これまでソメイヨシノの開花日を観測してきた多くの測候所が相次いで廃止・無人化され、最近の著しい暖冬傾向の影響を受けた多くの地点の開花日がわからなくなった。そこで本研究では、新しいモデルを構築するためのソメイヨシノの開花日のデータとして、鉄道会社や観光協会により調査・集計された開花状況の情報のうち、新聞などを通じて告知または報道されたものを用いることにした。そこで取り上げられた地点のうち、ソメイヨシノが樹種の大勢を占め、なおかつ周辺約 3 km 以内に気温の観測されている AMeDAS 観測点が存在する事例を選んだ。解析の対象年は、詳細な開花データの得られた 2001 年、2007 年、2008 年、2013 年、2014 年の 5 か年である。この中には極度の暖冬年 (2007 年) と厳冬年 (2013 年) も含まれている。

解析地点数は、解析年によって多少変動するが、2001 年は 126 地点と最も少なく、2007 年は 223 地点、2008 年は 216 地点、2013 年も 216 地点、2014 年は 217 地点であった。なお、2001 年の開花日データは青野・守屋 (2003) の研究の際に外部検証に使用する目的で収集したもの、2007 年のデータは開花前の冬季の気温が全般に平年に比べ $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 高かったことから極度の暖冬年の開花状況の解析を目的に集めたもの、2013 年のデータは逆に冬季の気温が西日本で 1°C 程度低く、厳冬年の開花分布のパターン分析を目的に収集したものである。他の 2008 年と 2014 年のデータはそれらとの対比の目的から収集したものである。Fig. 1 に地点数の最も多かった 2007 年における解析地点

Fig. 1. Distribution of sites, at which cherry blossom phenology was observed in 2007, for calibration of the model III.

の分布を示す。新しいモデルの構築や内部検証のための解析では、これらの地点の開花日と近隣の AMeDAS の日平均気温のデータを用いた。

これとは別に、新しいモデルを外部検証する目的で、全国 77 地点の気象官署（既に廃止された官署を含む）における、1961～2010 年の 50 年間にわたるソメイヨシノの開花日と日平均気温のデータを用いた。このほか、既存のモデルや新しいモデルにおける温度変換日数の起算日を求める目的で、メッシュ気候値（2010 年版）も併用した。

2.2 温度変換日数法について

温度変換日数とは、ある一定の温度条件で 1 日間置かれたときの植物の生育過程が、あらかじめ決められた標準温度 T_s (K) の下での条件に変換すると何日分の生育過程に相当するかを表す指数である。日平均気温が T_j (K) である i 年の DOY（または通日） j における温度変換日数 $(t_s)_{ij}$ (日) は、以下の (1) 式のように表すことができる。

$$(t_s)_{ij} = \exp \left\{ \frac{E_a(T_j - T_s)}{RT_j T_s} \right\} \quad (1)$$

ここで E_a は生育の温度に対する応答の特性を代表する温度特性値 (J mol^{-1})、 R は普遍気体定数 ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) である。本研究では、青野・守屋 (2003) にならい、標準温度 T_s を 15°C (288.2 K)、 E_a を 70 kJ mol^{-1} として、ソメイヨシノの開花日の推定モデルに一貫して使用した。

温度変換日数法は、生育などを推定するための積算モデルであり、注目の生育ステージまでに要する積算値を一定と考えるのが計算方法のベースとなる。開花日の推定の際には、地点ごとに定められた適切な起算日から式 (1) の $(t_s)_{ij}$ を積算し始め、その値があらかじめ定められた特定の値に達した日を推定開花日とする。開花日の推定計算の際に適切な値として用いる起算日と積算値の決定・設定の方法次第で、複雑な解析が必要になったり、簡単な手順で適用可能にもなる。本研究では、次節以下で詳しく説明する通り、モデル変数の決定・設定方法によって、便宜上、推定方法をモデル I、II、III に呼び分ける。モデル I と II は既存モデル、モデル III が本研究で提案する新モデルに相当する。本研究の目的は、自発休眠覚醒時期の年次変動を考慮した簡便化モデル、すなわちモデル III の構築と精度検証を行うことである。

2.3 これまでのモデル一般化の経緯と問題点

モデル I は通常温度変換日数法であり、適切な地点ごとの起算日と開花までに必要な平均積算値とを過去数十年分の開花と日平均気温データを用いた解析を通して、地点ごとに独立的に決定する方法である（小元・青野，1989；青野・小元，1992）。モデル I では過去数十年間のデータを用いた開花日の推定誤差に関する解析を繰り返し行い、その解析結果の中から最も推定精度を小さくした起算日 (D_1) と、それに対応する平均積算値 (DTS_1) とを選択する。そのため、過去数十年分の開花日のデータのない地点ではこのモデル I の適用が困難である。

モデル II は、青野・守屋 (2003) により提案されたモデル

のうち、自発休眠覚醒の過程が考慮される前の一般化モデルである。前にも述べたようにソメイヨシノは個体による遺伝的変異が小さいと考えられる。このことからその研究では、自発休眠の覚醒時から開花までに必要な温度変換日数の積算値はほぼ同じと考え、この積算値の全国共通の最適値を 23.8 日と、全国各地の開花日の解析を通して決定した。このモデル II では、こうして求めた全国共通の積算値 23.8 日（以下、 DTS_2 と記す）と、それに対応する起算日 D_2 との組み合わせで開花日を推定するものである。

この起算日 D_2 は各地で開花日を正確に推定できるモデル I の起算日に比較的近いことから、暖地では自発休眠が覚醒し花芽の発達が再び始まる地点ごとの平均日と解釈できる。モデル I の起算日決定の煩雑な手順とは対照的に、モデル II で用いる起算日 D_2 は 3 つの地理的・環境的変数を使って、比較的簡単に地点ごとに計算できる。モデル II では、 D_2 以後の積算値が DTS_2 (23.8 日分) に達した日を推定開花日とする。モデル II で使われる起算日 D_2 (DOY) は下の (2) 式で推定される。

$$D_2 = 136.765 - 7.689\psi + 0.133\psi^2 - 1.307 \ln L + 0.144T_F + 0.285T_F^2 \quad (2)$$

ここで ψ は緯度 ($^\circ\text{N}$)、 L は海岸からの距離 (km)、 T_F は 1, 2, 3 月の平均気温の平年値 ($^\circ\text{C}$) である。なお、海岸沿いの地点の場合、 L には 1 km を適用する。起算日 D_2 は自発休眠の覚醒が遅くなると思われる低緯度の温暖な地点ほど遅れる。また逆に内陸の地点ほど早くなる傾向も見られる。一方、東北地方北部など北に位置する寒冷地でも D_2 は遅く

Fig. 2. Distribution of the starting date D_2 , calculated by using of equation (2).

なる。この式(2)は、以上の点を考慮して説明変数が選ばれ導出されたものである(詳細は青野・守屋(2003)参照)。Fig. 2に(2)式で計算した起算日 D_2 の分布を示す。中部地方から西日本の山岳部の大部分で D_2 がDOY 30日以前と最も早く、それより寒冷でも温暖な地域でも D_2 は遅くなる。

モデルⅡの起算日 D_2 を使って開花日を推定した場合、東日本～北日本の比較的寒冷な地点ではRMSEが2日以下と開花日の推定精度が高くなるものの、九州から四国にかけての暖地や太平洋上の離島では推定誤差が3日を上回ることが多かった(青野・守屋, 2003)。ここでモデルⅡに関する問題点を考察する。Fig. 3は極度の暖冬年である2007年と厳冬年であった2013年について、双方の年でデータの得られた新モデル構築用の地点を対象に、各地点の D_2 から実際の開花日までに積算された温度変換日数を計算し、地方ごとの平均値と標準偏差の分布を示したものである。各地の D_2 以降、開花までに実際に必要となった積算値は、東北地方の場合は双方の年とも平均値が23.8日にほとんど一致した。しかし、北陸地方、近畿地方、九州地方南部と暖かい地域になるにしたがって、暖冬後(2007年)には、より多くの積算値が実際の開花までに必要になるのに対し、厳冬後(2013年)には逆にこれが少なくなる傾向が全般的に見られた。このことは暖地であるほど起算日 D_2 と実際に自発休眠が覚醒する時期との間が詰まる(あるいは相前後する)ことから、自発休眠覚醒時期がその冬季の気温条件次第で変動し、それによって起算日 D_2 から実際の開花までの積算値が見かけ上、年次変動することを示唆している。モデルⅡでは、同じ地点である限りは年次によらず起算日(D_2)も積算値($DTS_2=23.8$ 日)も一定のままであるので、冬季の気温が平年値を大きく外れるほど、またそれが暖地であるほど、推定誤差が大きくなる現象が生じることになる。

Fig. 3. Averages and standard deviations of DTS accumulations from starting date D_2 after warm (2007) and cold (2013) winters, separately compiled for some districts in Japan.

温帯落葉樹の開花日の推定精度を上げたい場合には、どのようなモデルを用いた場合でも、結局は年々の自発休眠期の気温条件を考慮する必要がある(たとえば Legave *et al.*, 2013)。上記のモデルⅡの自発休眠覚醒時期の年次変動にともなう暖地で発生する誤差を少なくするには、年ごとに積算値を補正するか、起算日を補正するかの二者択一となる。青野・守屋(2003)は、上のうち前者の方法を選択し、解析を行ったが、結果的に低温の効果を考慮し始めるべき時期の決定の際や、低温の効果そのものを考慮するための特別気温の解析の際に必要な手順が煩雑なモデルとなり、モデルⅡの持つ、簡単に開花日を推定できる、という最大の特徴を失うものとなった。

モデルⅡの一般化された開花日の推定手順をなるべく継承したモデルの改善のためには、①開花日までに要する積算値としてモデルⅡで決められた23.8日を用いる、②起算日としてモデルⅡで決定した D_2 を基準として、暖地では冬季の気温条件によって年毎に起算日の補正量を決める、③Fig. 3からも推測できるように、厳冬後ほど起算日が D_2 よりも早くなるように、またこの補正幅が冬季に暖かい地点ほど同じ年であっても大きくなるように設定する、以上の3点を満たすことが必要と考えた。次章以下では、上記の①～③を考慮しつつ、モデルⅡの起算日の年次による補正を通して推定精度の向上を目指したモデルⅢの構築を試みた結果について述べる。

3. 自発休眠期の気温を用いた起算日の補正方法の確立

3.1 モデルⅢの起算日補正の考え方

モデルⅢでは、モデルⅡの起算日 D_2 を冬の気候条件次第で年ごとに補正する。開花までに要する温度変換日数の積算値は、モデルⅡと同様に23.8日で一定と考える。起算日 D_2 に対する補正量については、i) 自発休眠期における年ごとの寒暖と、ii) 地点ごとの冬季の気候条件(すなわち暖地か寒冷地か)を考慮して求める必要があると考えた。まずii)の地点ごとの冬季の気候条件を表す指標として、本研究では、11月から1月の期間中の、月別の平均、最高、最低気温を用いて検討した。モデル構築に用いた5か年について、各地の冬季の気温と、 D_2 から実際の開花までの積算値の変動との関係を検討した結果、地点ごとの冬季の気候条件を12～1月の平均気温の平年値 T_{DJ} ($^{\circ}\text{C}$)によって表すことが適当と判断した。

一方i)については、年ごとの自発休眠覚醒の進み具合を代表する起算日の補正係数を C_i とし、年ごとに1つの値を決めることにした。モデルⅢでは、その年の自発休眠覚醒の全般的な進み具合を代表する C_i と、各地の T_{DJ} を用いて、次のように年ごと・地点ごとの起算日 D_{3i} を決めることにする。

$$D_{3i} = D_2 + C_i \cdot \max\{T_{DJ} - 1.5, 0\} \quad (3)$$

寒冷な地域における起算日の補正は、本研究では不要なものとし、Richardson *et al.* (1974)は、チルユニット算出時に、休眠覚醒に効果なしとされる下限温度を 1.5°C と設定している。本研究では T_{DJ} について $0 \sim 5^{\circ}\text{C}$ の間に下限温度をいくつか設け、極度の暖冬年(2007年)や厳

冬年（2013 年）に関して、各地点の起算日を予備的に補正し、開花までに実際に要した温度変換日数の積算値を比較した。その結果 T_{Di} が 1.5°C 以下の地点では、下限温度をそれ以下に設けて補正を加えても精度が向上しないことから、 T_{Di} の下限温度として 1.5°C を設け、(3) 式に反映させることにした。

3.2 年ごとの補正係数の算出

モデル構築に用いた 5 年について、(3) 式の補正係数としてさまざまな値をあてはめ、全地点を対象にした推定開花日の RMSE を逐一算出し、その変化を Fig. 4 のように調べることによって、各年の補正係数の値を数値的に求めた。Fig. 4 において、各年に対応する 5 つの曲線のそれぞれで最小になった時の補正係数の値を選んだ (Table 1)。5 年のうち最も暖冬だった 2007 年は、正の値の補正係数を与えたときに、逆に最も冬が厳しかった 2013 年は負の（最も小さな）値の補正係数を与えた時に RMSE が最小となった。こうした結果は、各年の冬季の全般的な気候条件と補正係数の年による変化との間に関係があることを示唆した。

3.3 補正係数の決定方法に関する解析

そこで、自発休眠期の全般的な気温条件から年ごとに補正係数を決定する目的で、全般的な暖冬／厳冬傾向をなるべく簡単に把握すべく、いくつか特定の気象官署を選び、

Fig. 4. Change in RMSE of estimated first flowering dates for each year, as a function of correction coefficient.

Table 1. Correction coefficient (C_i), derived as numerical solution, which gave minimum RMSE of estimated first flowering dates for each year.

Year	Number of sites	Correction coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Minimized RMSE (d)
2001	126	-0.60	2.57
2007	223	0.24	3.18
2008	216	-0.70	2.80
2013	216	-1.76	3.17
2014	217	-1.22	2.74

それらの冬季の気温を平均して指標化し、注目の年の暖地全体の冬季の厳しさを判断することにした。これによって日本の暖地全般の冬季の厳しさを代表させるため、この指標がなるべく長期にわたり計算可能で、なおかつ暖地全体の気温の年々推移との間に長期間かけてバイアスが発生するような都市昇温などの影響がほとんど考えられない観測点の気温に基づくことが望ましい。そこで本研究では、自発休眠期の全般的な気温条件を代表させる気象官署として、(A) 大都市圏に含まれず、海沿いにあたるなど、都市温暖化の影響が小さいと予想される位置にある、(B) 標高の影響を受けず、関東地方以西にある、(C) 19 世紀末から継続的に気温の観測が行われている、といった 3 つの条件を満たす気象官署（現在は無人化された測候所を含む）をスクリーニングした。それを踏まえ、さらに各官署の気温データの相互相関分析の結果や、冬季の気温が低すぎない地域かどうかについても検討した結果、銚子、伏木、境、浜田、多度津、厳原、名瀬の 7 つの気象官署を選んだ。

7 つの気象官署（または、廃止後の特別地域気象観測所）について、冬季（11～1 月）のさまざまな期間に関する平均気温をそれぞれ求め、さらにそれらの 7 地点平均値を用いて、数値的に求めた補正係数 (Table 1) との相関を分析しながら、この補正係数の計算方法を検討した。その結果、サクラの自発休眠の完了に向けて低温が影響する時期（五井, 1982; 花岡ら, 1980）にあたる 11～1 月全体の平均気温を用いた場合に両者の相関が最も高くなることがわかった。この 11～1 月における 7 地点の平均気温を T_{Ai} とした。この T_{Ai} と、5 年についてそれぞれ求めた Table 1 の中の補正係数との関係を求めた。5 年それぞれの T_{Ai} と数値的に求められた補正係数との関係を Fig. 5 に示す。2 回帰を使って得られた関係は、

$$C_i = 0.2104T_{Ai}^2 - 3.151T_{Ai} + 9.744 \quad (R^2 = 0.93; P < 0.1\% \text{ で有意}) \quad (4)$$

と表すことができた。7 地点の平均気温 T_{Ai} と、(4) 式を用いて計算した補正係数の年々推移を Fig. 6 に示す。こうして求めた補正係数が、各年の冬季の気温のもたらした自発

Fig. 5. Relationship between temperature during endodormancy period T_{Ai} , derived from observations at 7 stations in warmer region in Japan, and suitable value of correction coefficient, C_i , for corresponding year.

休眠覚醒の進捗の早まり／遅れを相対的に示すと考える。なお、Fig. 6 で示した C_i の年々変化は、 -1 を中心に推移しており、ほとんどの年の起算日 D_{3i} が D_2 よりも早めに補正されることになる。青野・小元 (1990) によると、モデル I で用いられた平均積算値は全般に過大に算出される傾向があり、これが推定精度にも影響する。この性質はモデル II の平均積算値 ($DTS_2=23.8$ 日) にも引き継がれている。起算日を D_{3i} へ補正するプロセスには、平均積算値 DTS_2 の過大評価の影響をキャンセルする効果も期待される。

モデル III では、こうして T_{Ai} から式 (4) を通して求められた C_i を式 (3) に代入し、各地の 12 ～ 1 月の平均気温の平年値 T_{Di} をともに用いて計算された年ごとの起算日 D_{3i} を用いて、開花日の推定を行った。

4. 開花日の推定結果と考察

4.1 内部検証

モデル III の作成に用いた 5 か年について、このモデルを実際に適用して開花日の推定し、その結果をモデル II によるものと比較した。Fig. 7 は、厳冬後の 2013 年における

Fig. 6. Secular changes in temperature during endodormancy period T_{Ai} (top panel) and correction coefficient calculations C_i deduced from equation (4) (bottom panel).

Fig. 7. Comparison between actual and estimated first flowering dates in 2013.

る 216 地点のモデル II と III による推定開花日と実際の開花日との関係をプロットしたものである。モデル II では開花が DOY 70 ～ 90 と相対的に早く温暖な地点ほど、実際よりも遅く開花日が推定されていたが、モデル III の導入により、これらの地点で推定開花日を実際に近づけることができた。Table 2 に 2013 年を含む 5 か年についてモデル II と III を適用した際の全国平均の推定誤差を RMSE で示す。2013 年における開花日の推定誤差は RMSE でモデル II の場合には 5.08 日であったのに対し、モデル III では 3.17 日まで減らせた。その他の年についても、日本全体で集計した RMSE を最悪でも 3.2 日程度にまで減らせることができた。

観光関連の観点でソメイヨシノの開花日に注目する場合、休日や祝祭日と花見の時期が重なるかが重要視される (たとえば Sakurai *et al.*, 2011)。したがって、観光関連目的の用途でモデルの適用を考える場合、どの週末に開花時期が重なるかについて、最低でも推定できることが望ましいと考えられ、1 週間 (7 日間) の半分、すなわち 3 日程度の精度は必要と著者らは考えた。今回のモデル III の内部検証の結果は、上記の精度的な必要条件について、冬季の気温が平年に対してかなり大きく変動した年であってもクリアできたことを示したと考えている。

4.2 気象官署の開花データを用いた外部検証

続いて、1961 ～ 2010 年の 50 年にわたる気象官署による観測結果を用いたモデル III の外部検証を行った結果について述べる。まず、モデル III によって RMSE が大きく減少した例として、東京、高知、長崎、種子島の 4 地点を選び、開花日の経年変化の推定結果を示す (Fig. 8)。東京、高知、長崎では、モデル II の推定開花日は実際よりも全般に遅い傾向があり、しかも変動の大きさもいくぶん小さかったのに対し、モデル III の導入後には、実際の開花日に推定開花日はかなり近くなった。また、ソメイヨシノの開花が観測される最も暖かい地点の種子島のような極端な暖地では、休眠が覚醒する時期の年々変動の影響もあって、実際の開花日が大きく変動するのに対し、モデル II による推定結果はその変動を捉えきっておらず DOY 90 ～ 100 付近をほぼ一定に推移していたのに対して、モデル III による推定開花日は休眠覚醒時期の年変動からくる開花日の大きな振れを比較的正確に捉えることができ、モデル III の導入による開花日の推定誤差の減少が最も顕著に現れることとなった。

ここで外部検証対象の全 77 気象官署について、モデル II と III による推定開花日の 50 年間の RMSE を求め、それらを度数分布にまとめてモデル同士で比較した (Fig. 9)。

Table 2. RMSE in the estimation of first flowering dates, applying models II and III. C_i , used in the model III, was calculated from equation (4).

Year	T_{Ai} (°C)	C_i (d °C ⁻¹)	RMSE (d)	
			model II	model III
2001	9.9	-0.83	2.79	2.77
2007	10.7	0.12	3.25	3.21
2008	10.3	-0.39	3.04	2.89
2013	8.7	-1.74	5.08	3.17
2014	9.5	-1.20	3.46	2.75

モデルⅡの場合、RMSE がモデル精度の必要条件の目標としている3日を超えた地点が合計35地点であった。対して、モデルⅢ導入後はこれが19地点まで減少した。モデルⅡ

Fig. 8. Secular changes in first flowering dates, observed and estimated by models II and III. At these four stations, improvements of accuracies, induced by the model III, were notable.

では RMSE が 3.5 ～ 5.0 日となった地点も各々の度数区分で 5 ～ 10 地点ほどあったが、モデルⅢ導入後はこうした地点も減少し RMSE が 2 ～ 3 日程度に収まった地点が増えたとみられる。モデルⅡの RMSE は全地点の平均で 3.24 日あったが、モデルⅢの導入後はこれが 0.48 日小さい 2.76 日まで抑えられていた。

九州地方や四国地方でモデルⅢによる RMSE が、長崎や熊本、宇和島、高知など過半数の 9 地点で 3 日を下回った。したがって、前節で触れたような観光関連の目的で精度的に必要な条件、すなわち推定誤差が 3 日を下回ることを、暖地のかなりの地点でクリアできたと言える。

Fig. 9. Frequency distributions of RMSE of estimated first flowering dates by the models II and III, with 0.5-day intervals of class.

Fig. 10. Change in root mean square error, induced by alternation of applied model (from the model II to III).

モデルⅡの適用時の RMSE に対する、モデルⅢ導入後の RMSE の変化の分布を Fig. 10 に示す。12～1月の気温が 1.5°C を下回り、モデルⅡとⅢの間で起算日に変わらなかった東北地方では、RMSE についても変化が認められない。一方、関東以西では、モデルⅢ導入後の誤差が全般的に減少した地点が多く存在した。宇和島では2.4日、長崎では2.1日 RMSE が減少するなど、九州や四国の暖地の多くの地点でモデルⅢの導入に伴い RMSE が $1.0\sim 2.5$ 日程度小さくなった。特にモデルⅡでは RMSE が10.9日と極めて大きかった種子島ではモデルⅢ導入による RMSE の減少幅が4.7日に達した。

こうしたモデルⅢによる推定精度を、既往研究のモデルによるものと比較した。たとえば、東京の場合はモデルⅢの適用により RMSE を3.01日まで小さくできたが、実際に以前の中央气象台による開花予測に使われていた多項式による方法(坂井・河原(1952), RMSE は最小で1.69日)や有効積算気温による方法(青野(1991), RMSE は2.00日)には精度面では及ばない。千葉県館山でもモデルⅢによる RMSE は4.05日であり、既往研究(篠崎・安西, 1954)の富崎における多項式による推定結果(RMSE は2.52日)よりもかなり大きくなった。既往研究では、多項式や有効積算気温などによる推定方法を、地点ごとに最適な推定結果を与えるよう慎重に調整・キャリブレーションしたものであるため、汎用性を持たせようとした本研究の新しいモデルは、これらの地点において精度面で遜色が見られても仕方のない面がある。その代わり、地点ごとの既往研究のモデルは他地点にそのままでは使用できない。

また、他の地点に目を転じると、熊谷(江原, 1941)や下関(熊野, 1957)、徳島(植谷, 1941)などの地点における既往研究による推定精度に対しては、モデルⅢによる推定精度の方が高いか悪くても同程度であることも確認された。既往の方法による推定精度に対するモデルⅢの精度の良し悪しは、地点によってまちまちであり、地域性など一定の傾向も認められなかった。

4.3 モデルⅢの導入にともなう精度低下とそれへの対処

以上までが本研究で提案されたモデルⅢの構築と検証の結果である。モデルⅡに対して推定精度の向上を目標に作成したモデルⅢではあるが、Fig. 10に見るように、モデルⅢの導入によって誤差が却って増加した地点が存在した。具体的には、大阪や京都から福井県にかけての地域、佐渡島の相川、九州の南部、そして八丈島で、誤差の顕著な増加が認められた。うち大阪では RMSE の増加幅が1.45日、九州南部の宮崎ではこれが1.63日、八丈島ではこれが3.45日であった。

そこでモデルⅢの導入により、誤差が却って増加した地点について、開花日の推定結果を詳しく考察し、モデルⅢの導入によって誤差が増加した場合に実行可能な対処方法を考え、ここに提案することにした。こうした地点の代表として、上に挙げた大阪、宮崎、八丈島における年々の開花日の推定結果を Fig. 11 に示す。これらの地点における計算プロセスを詳細に調べた結果、モデルⅡに起算日として使用され、さらにモデルⅢでも式(3)を通して起算日の計算に利用する D_2 の計算誤差が大きいことがわかった。

Fig. 11. Secular changes in first flowering dates observed and estimated by the model II and III. At these three stations, adversely, accuracy drops were induced by the model III. Therefore, attempts to reconsider in starting dates D_2 were made.

解析により、(2)式による D_2 の計算値は、実際の値(実際の開花日までの温度変換日数の平均積算値を正確に23.8日とする起算日)と比べると、大阪で5日、宮崎で7日、八丈島で12日早かった。そこで、これらの日数分だけ D_2 の計算値を遅らせるように調整した上で式(3)に代入し、 D_{3i} を求めてモデルⅢにより開花日を推定した結果、Fig. 11にあるように推定開花日を実際の値に近づけることができた。Fig. 11に示した3地点については、 D_2 の調整により大阪では3.69日から2.31日へ、宮崎では5.05日から3.12日へ、八丈島では10.00日から5.11日へと RMSE がそれぞれ減少した。なお、これら3地点におけるモデルⅡによる推定開花日の RMSE は、それぞれ2.24日、3.42日、6.50日である。

本研究でモデルⅢ導入後に推定誤差が増加した地点(Fig. 10の暖色系の色のプロットが描かれた地点)では、このような起算日 D_2 の(2)式における計算誤差が見られた事例が多かった。モデルⅢ導入により推定精度が却って低くなるのが推定方法の利用後数年経て分かった場合には、上で示した3地点の例のように、(3)式に代入する D_2 の計算値を微調整した上で D_{3i} を求めることによって推定精度を高く保つ方法があることを論末に述べておきたい。

5. おわりに

日本におけるソメイヨシノの開花日について、過去の開花と気温の観測値を必要とせず、また自発休眠覚醒時期の年々変動を考慮した、温度変換日数法による簡便化モデルを構築した。冬季に温暖な地域ほど自発休眠が覚醒する時期の年次変動は大きい。また、暖冬・厳冬の程度が顕著な年ほどこうした傾向は強くなる。本研究では休眠覚醒を考慮しなかった既往の一般化モデルにおける積算の起算日について、上記2つの休眠覚醒の特徴を考慮して、年ごと、地点ごとに起算日を補正できるようなモデルを作成した。

今回のモデル簡便化に使用した全国の約 200 地点における推定開花日に関する内部検証によると、全国規模で集計した RMSE を 3.2 日程度以下には減らすことができたことがわかった。全国 77 地点の気象官署によるデータを用いた外部検証では、従前の休眠覚醒を考慮しない一般化モデルで RMSE が 3 日を上回る地点が 77 地点中 35 地点に上ったが、本研究で作成したモデルではこれが 19 地点にまで減少したことが示された。新しいモデルの導入後に精度が改善しなかった地点の場合、補正前の起算日を微調整することによって精度向上への対応が可能と考えている。

引用文献

- Albuquerque N, Garcia-Montiel F, Carrillo A, Burgos L, 2008: Chilling and heat requirements of sweet cherry cultivars and the relationship between altitude and the probability of satisfying the chill requirements. *Environmental and Experimental Botany* **64**, 162-170.
- 青野靖之, 1991: 温度変換日数法によるソメイヨシノの開花に関する気候学的研究. 大阪府立大学農学研究科博士論文, 144p.
- 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.
- 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.
- 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.
- 江原武吉, 1941: 熊谷に於ける桜の開花と気象との関係に就て. *天気と気候* **8**, 679-688.
- 江幡守衛・石川雅史, 1987: 植物季節と有効積算気温—名古屋におけるソメイヨシノの開花日について—. *日本農業気象学会東海支部会誌* **45**, 27-29.
- Erez A, Couvillon GA, Hendershott CH, 1979a: Quantitative chilling enhancement and negation in peach buds by high temperatures in a daily cycle. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **104**, 536-540.
- Erez A, Couvillon GA, Hendershott CH, 1979b: The effect of cycle length on chilling negation by high temperatures in dormant peach leaf buds. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **104**, 573-576.
- Felker FC, Robitaille H A, 1985: Chilling accumulation and rest of sour cherry flower buds. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **110**, 227-232.
- 伏木測候所, 1953: 伏木における桜花期の気象分析. 中央気象台研究時報 **5**, 147-158.
- 五井正憲, 1982: 温帯花木の花芽形成ならびに開花調節に関する研究. 香川大学農学部紀要 **38**, 1-120.
- 花岡喜重・茂木孝夫・森 昭, 1980: 標高差による花木の生態的研究 II ヒガンザクラ, モモ, ウメについて. 群馬県園芸試験場報告 **8**, 1-18.
- Hur J, Ahn J-B, Shim K-M, 2014: The change of cherry first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation. *International Journal of Climatology* **34**, 2308-2319.
- 飯田義彦・今西純一・森本幸裕, 2013: 吉野山ヤマザクラ樹林におけるフェノロジー個体差が桜景観維持に果たす役割. *ランドスケープ研究* **76**, 451-456.
- Inoue T, Nagai S, 2015: Influence of temperature change on plant tourism in Japan: a case study of the flowering of *Lycoris radiata* (red spider lily). *Japanese Journal of Biometeorology* **52**, 175-184.
- 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.
- 熊野羊太郎, 1957: 下関における桜（そめいよしの）の開花日、満開日の予想について. *産業気象調査報告* **20**, 75-78.
- Legave JM, Blanke M, Christen D, Giovannini D, Mathieu V, Oger R, 2013: A comprehensive overview of the spatial and temporal variability of apple bud dormancy release and blooming phenology in Western Europe. *International Journal of Biometeorology* **57**, 317-331.
- Lindsey AA, 1963: Accuracy of duration temperature summing and its use for *Prunus serrulata*. *Ecology* **44**, 149-151.
- 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.
- Matzner P, Blümel K, Chmielewski FM, 2014: Models for the beginning of sour cherry blossom. *International Journal of Biometeorology* **58**, 703-715.
- 村上 寛・末松信彦・水戸喜平・中村新市, 2006: 南伊豆地域における‘カワヅザクラ’ (*Prunus lannesiana* Wils. ‘Kawazu-zakura’) の開花期. *園芸学研究* **5**, 331-336.
- 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.
- 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.
- 坂井恭生・河原律子, 1952: 東京における桜（ソメイヨシノ）の開花予想. *産業気象調査報告* **16**, 65-69.
- Sakurai R, Jacobson SK, Kobori H, Primack R, Oka K, Komatsu N, Machida R, 2011: Culture and climate change: Japanese cherry blossom festivals and stakeholders’ knowledge and attitudes about global climate change. *Biological Conservation* **144**, 654-658.
- 篠崎猛夫・安西武雄, 1954: 富崎における染井吉野桜の開花予想. *産業気象調査報告* **17**, 112-114.
- 植谷 勇, 1941: 桜の開花及満開期日. *天気と気候* **8**, 214-216.
- 塚原あずみ・林 陽生, 2012: 温暖化がサクラの開花期間に及ぼす影響. *地球環境* **17**, 31-36.
- Weinberger JH, 1950: Chilling requirements of peach varieties. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* **56**, 122-128.
- 吉野正敏, 2012: 季節感・季節観と季節学の歴史. *地球環境* **17**, 3-14.