

# 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

青野靖之・守屋千晶<sup>†</sup>

(大阪府立大学大学院 農学生命科学研究科 大気環境学研究室)

## A Generalized Model to Estimate Flowering for Cherry Tree (*Prunus yedoensis*) Considering both Processes of Endodormancy Completion and Development

Yasuyuki AONO and Chiaki MORIYA\*

(Laboratory of Atmospheric Environment, Graduate School of Agriculture and Biological Science,  
Osaka Prefecture University, Sakai, 599-8531 Japan)

### Abstract

The generalization of model to estimate flowering dates for cherry trees (*Prunus yedoensis*) is attempted, considering processes both of endodormancy completion and development. As the basis of estimation, an accumulation model using an exponential function of daily mean temperature, called DTS (the number of days transformed to standard temperature) method, is used for expressing development of flower buds. The flowering date is estimated as the date on which the DTS, accumulated since a suitable starting date, reaches a predetermined DTS value.

In this study, three models with different procedures to determine suitable starting date and DTS accumulations for flowering are constructed and verified, using data from meteorological stations in the warm region of Japan. The model A requires the complex procedure with analysis of previous temperature and phenological data to determine suitable starting date and DTS accumulations in each station, although this model gives accurate estimations. The generalized model B, without consideration of endodormancy completion process, includes the simplified procedure for determination of starting date and the constant DTS accumulations for flowering for all stations in Japan. However, in the warm region of Japan, interannual variation in advancement of the endodormancy completion process, which was influenced by winter temperature conditions, causes the change in the DTS accumulation required until the actual flowering date, and is attributed to the reduction in accuracy of estimations from models A and B.

In generalized model C with consideration of endodormancy completion process, the suitable starting date is determined for each station, applying the equation, which includes some climatic and topographic factors, and the DTS accumulations for flowering are deduced as a function of the chill-unit accumulations, which represents the degree of endodormancy completion advancement in each year. On Hachijojima island, near the warm-side boundary for growing, model C reduced RMSE of estimates to 3.1 days from 6.4 days of that from model A. In the model verification using data from the warm region, the averages of RMSEs in estimations from models A, B and C were 2.7, 3.0 and 2.8 days, respectively. It means that the consideration of endodormancy completion process in model C compensated the decrease in model accuracy, which is attributed to introducing some simplified procedures into the model.

---

2001年6月29日 全国大会にて一部発表

2001年11月15日 近畿支部大会にて発表

2002年10月3日 受付, 2003年3月4日 受理

<sup>†</sup>現在, 株式会社天満屋

**Key words:** DTS-method, Endodormancy completion process, Flowering date, Generalization of model, *Prunus yedoensis*.

**キーワード:** 温度変換日数法, 開花日, 休眠解除過程, ソメイヨシノ, モデルの一般化

## 1. はじめに

ソメイヨシノの開花時期は、春先の気温の推移と密接な関係があり、また欠測の少ない長期にわたるデータが多数の地点で得られている上、その予測に対する関心も高いことから、この開花時期の気候学的分析についてはこれまでに多くの研究が行われてきた。

開花を通して植物に対する気候影響評価を行う場合、気温条件と開花日との関係を定量的に、かつ正確に求める必要がある。過去には、月平均、日平均気温を用いた回帰式 (Sakai and Kawahara, 1952; Fushiki Weather Station, 1953; Kumano, 1957) や、積算気温モデル (Lindsey, 1963; Ebata and Ishikawa, 1987) を使って解析した例が多数見られた。その後、Konno and Sugihara (1986) によって生体の活性の温度に伴う変化を表す指標である温度変換日数 (以下、DTS と記す) が提案され、Omoto and Aono (1989) が、この指標を積算する DTS 法によって全国各地におけるソメイヨシノの開花日を RMSE (平均二乗平方根誤差) で 1~3 日の範囲内でかなり正確に推定できることを示した。

ただし、この方法については実際に開花日の推定に適用する上でいくつかの課題も残された。DTS 法を用いた開花日の推定では、高い推定精度を得るために通常、開花までに要する DTS の平均積算値や DTS の積算を始める起算日といった、地点特有の複数の感温特性値と呼ばれる変数の適切な数値を、過去の複数年の日平均気温の推移や実際の開花日を解析して選ぶことが必要になる。以上の理由で、過去複数年の開花や気温データの無い任意の地点での DTS 法の適用が困難となることの一つ目の課題となった。こうした問題を解決するために、Aono and Omoto (1990b) は、起算日や DTS 積算値の決定方法を簡便化し、なるだけ高い精度を保つような簡便化されたモデルの作成を試みた。

しかしながら、通常の方法、そして上記のように簡便化された方法、いずれの場合も九州や太平洋上の離島のような暖地では、推定精度が極端に悪くなる地点が見られた。DTS 法を含めた気温を用いた一般的な積算モデルは、特定の生育ステージ間の積算値を一定と仮定して計算を行うものである。ところが暖地では冬季の休眠解除の遅速の差が大きく、その後、開花までで実際に必要な DTS 積算値も年によって相応に変化するために、推定誤差が増加する傾向がある (Omoto and Aono,

1989)。DTS 法に存在するあと一つの課題は、こうした暖地について休眠解除の遅れ・進みを全く考慮しないと開花日の大きな推定誤差を呼ぶことであった。

この解決には何らかの休眠解除の過程を DTS 法に考慮する必要がある。これまでもソメイヨシノ (Ebata and Ishikawa, 1987; Aono and Omoto, 1990a) あるいはウメ (Aono and Sato, 1996) の開花日や、クワの萌芽日 (Ito, 1991) などについて、気温を使った積算生育モデルを、自発休眠を解除させるのに有効な低温にさらされた時間数の定量的な評価結果に従って補正することにより、推定精度を向上させた例がある。ただし、注目の地点への適用のために、そのつど補正方法やパラメータの設定を必要とすることから、そのままでは、過去の複数年の開花や気温推移のデータがないと、こうした生育モデルへの休眠解除過程の考慮はできない。

開花を通して植物に対する気候影響を評価する際、地点ごとに複雑な解析を要するモデルは適用し難いと考えられる。たとえばメッシュ気候値などを用いて詳細な開花日分布を推定したり、さらにそれに基づく気候変化の影響評価への応用も困難となろう。加えて、近年では温暖化を想定した影響評価もしばしば行われるようになってきた (Murray *et al.*, 1989; Kai *et al.*, 1993)。その場合には、現在よりも冬季気温の高い地域が拡大することが予想されることから、モデルの一般化に加え、休眠解除過程を考慮しないと、上記のような影響評価への応用はより困難になると考えられる。そこで本研究では、ソメイヨシノを例にとって、i) 過去複数年分の開花と気温推移のデータのない地点における適用の困難さ、ii) 暖地における休眠解除過程の年変動もたらす開花日の推定精度の低下の 2 課題の双方を解決するような、一般化された DTS 法による開花日の推定モデルの作成を試みた。ここでは冬季の平均気温の平年値を使って休眠解除過程を考慮すべきかどうかを判定し、考慮すべき地点については上記の i) と ii) について、考慮不要と判断された地点については i) のみを満たすような開花日の推定モデルの一般化を最終的な目的とした。

## 2. データおよび解析方法の概要

### 2.1 解析期間と解析地点

本研究ではモデル作成のために、1961~1990 年の 30 年間に気象官署で観測された気温とソメイヨシノの開花日のデータを用いた。なお、休眠解除過程を考慮して開

花日を推定する場合には、開花前年の秋季から冬季にかけての気温データが必要となるので、1961年の開花日はモデル作成に考慮しなかった。モデルによる開花日の平均的な推定誤差は、上記30年間（休眠解除を考慮する場合には29年間）のRMSE（平均二乗平方根誤差）として表した。

モデル作成の解析に用いた地点は、上記30年間において開花日に欠測のなかった青森から徳島までの55地点（Fig. 1中の地点番号1～55）とした。このうち休眠解除の遅速の年変化を考慮したモデル作成に用いた地点は図中の黒丸の25地点である（これらの地点の選択基準の詳細については3.3.1項において述べる）。また、休眠解除過程を考慮したモデルを検証する目的で、上記の55地点とは別に、太平洋沿岸あるいは離島の暖地から6地点（Fig. 1中のA～F）を選び、解析に用いた。

### 2.2 温度変換日数 (DTS) について

DTSとは、ある一定の温度の下、ある日数置かれた条件下での植物の生長過程が、特定の標準温度の下での条件に変換すると何日分の生長過程に相当するかを表した指数である。日平均気温が $T_{ij}$  (K)である*i*年の通日*j*日における、標準温度 $T_s$  (K)への温度変換日数 $(t_s)_{ij}$ は、以下の式(1)により計算される。

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

ここで $E_a$ は温度特性値 ( $\text{J mol}^{-1}$ )、 $R$ はモル気体定数 ( $8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )である。本研究では標準温度 $T_s$ を $15^\circ\text{C}$  ( $288.2 \text{ K}$ )に、 $E_a$ をAono and Omoto (1990a)を参考に $70 \text{ kJ mol}^{-1}$ として開花日の推定モデルに使用した。

### 2.3 推定モデルと解析の概要

DTS法では、地点ごとに定めた適切な起算日（本研究のいずれのモデルにおいても年によっては変化させない）から式(1)の $(t_s)_{ij}$ の積算を始め、あらかじめ決めておいた特定の積算値に達した日を推定開花日とする。ここでは、地点ごとの適切な起算日と開花までに要するDTS積算値をどのように決めるかによって、次のモデルA, B, Cを作成し、開花日を推定し、またその精度を比較した。

#### 2.3.1 モデルA (通常のDTS法)

モデルAは、適切な起算日 $D_s$ と、開花日までに必要となる積算値の平均値 $DTS_s$ とを、過去の開花日と気温データの解析を通して地点ごとに独立的に決める方法である (Omoto and Aono, 1989; Aono and Omoto, 1992)。本研究では、30年間の実際の日平均気温の推移と開花日のデータを解析することによって、通日1～70日のそれぞれの起算日と、それに対応する開花日までの30年間のDTS平均積算値とのデータセットを作成した。このあと、すべてのデータセットを使って、それ

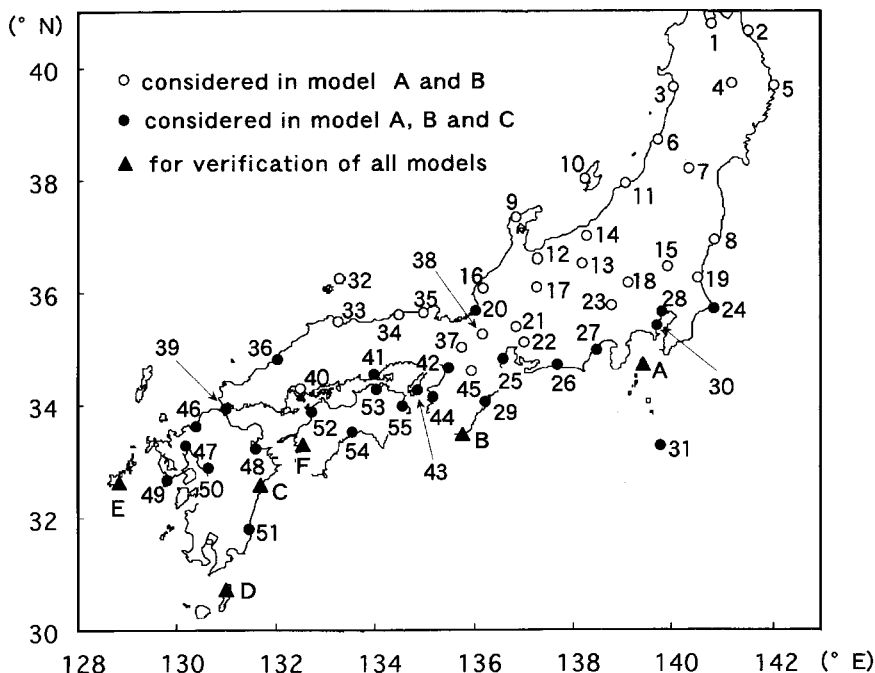


Fig. 1. Map showing meteorological stations used in this study. The numbers and letters indicated in this figure correspond to those in Tables 2 and 4, respectively.

ぞれ実際に開花日を推定し、そのときの推定開花日の RMSE をデータセットに加えた。このデータセットから、推定開花日の RMSE が最も小さくなる場合の起算日をその地点で適切な起算日  $D_s$  として選択し、これに対応する平均積算値をその地点の  $DTS_s$  としてモデルに使用した。

**2.3.2 モデル B (休眠解除を考慮しない一般化モデル)**

モデル B は、モデル A の地点ごとの過去のデータに基づいた解析を大幅に省略した一般化された方法であり、基本的には Aono and Omoto (1990b) が提案した簡便化モデルに準じる。このモデルでは全国一律に決めた開花までに必要な平均積算値と、1つの多項式から決めた起算日とを開花日の推定に用いる。休眠解除の影響を考慮しなくてもよいと判断された地点についてはこれを最終的な一般化モデルとして適用することになる。

全国各地で共通に適用できると見られる平均積算値  $DTS_m$  は、ここではモデル A に関する解析中に得られた(起算日-平均積算値-推定開花日の RMSE) のデータセットを改めて解析し、推定開花日の RMSE の 55 地点平均値を最も小さくする値とした。そして、このデータセットからこの  $DTS_m$  に対応する起算日 ( $D_m$ ) を地点ごとに見いだした。この起算日  $D_m$  を簡単にかつ正確に求められるような、気候ならびに地理的要素を説明変数とする 1 つの重回帰式を求めた。こうして求めた  $D_m$  の推定値 ( $D_{me}$ ) と全国一律の平均積算値  $DTS_m$  を DTS 法に適用することにより、過去の複数年の開花データと日平均気温の推移が得られなかった任意の地点でも、注目の年の気温データのみから開花日の計算が可能になる推定方法を検討した。

**2.3.3 モデル C (休眠を考慮した一般化モデル)**

モデル C は休眠解除の遅れ・進みの年による違いをモデル B のような一般化された開花日の推定方法に組み込もうとしたものである。本研究で暖地と判断される地点について適用するために構築を試みたものがこのモデル C である。

Aono and Omoto (1990a) では、休眠解除に有効な低温にさらされる機会の少ない暖地の暖冬年ほど休眠解除過程が遅れる影響から、開花までに必要な DTS 積算値がその平均値よりもかなり大きくなる傾向があることを示した。そこで本研究では、休眠解除の遅速を年ごとに推定し、それに基づいて、全国で適用可能な 1 つの関係式から年ごとに変化する開花に必要な DTS 積算値を求めようとした。休眠解除の遅速の指標としては、休眠解除に有効と思われる低温の範囲 (一般には 7°C 周辺以下) となった時間数を、そのまま (たとえば

Weinberger, 1950; Koma, 1953), あるいは効果に対応した重みを乗じた値 (チルユニット) に変換後 (たとえば Richardson *et al.*, 1974; Shaltout and Unrath, 1983), 積算した値が使われることが多い。本研究では Aono and Omoto (1990a) にならい Richardson *et al.* (1974) のチルユニットを用いた。これは休眠解除に対する気温の効果に応じて Table 1 にあるような重みを 1 時間ごとに積算して求められる。本来はチルユニットの積算値がある値になった時点で休眠完了したと判断するために使用するものであるが、本研究ではこの積算値そのものを休眠解除の遅速の指標とした。チルユニットの算出に用いる気温には気象官署の地上気象観測データの特別値 (1989 年以前は 3 時間ごとの観測値とそれによる 1 時間ごとの内挿値) を用いた。

このチルユニットの積算値とそれ以降の DTS の積算値の年ごとの値同士の関係を求める際には、どの時点が休眠期とその後の生育期との境界であるかを決めておく必要がある。本研究ではモデル A で求められた起算日  $D_s$  を双方の過程の境界と仮定した。暖地ではモデル A での起算日  $D_s$  が多少遅くなくても開花までに DTS 積算値を多く要する地点が散見された。そこでまず、モデル A の起算日  $D_s$  と平均積算値  $DTS_s$  を基に、上記の性質を持つ 7 地点を確実に暖地に存在する地点として選んだ (判断基準の詳細については 3.3.1 項で述べる)。そしてこれら 7 地点に関する  $D_s$  以前の年々のチルユニットの積算値と  $D_s$  以降の年々の DTS 積算値との間の関係式を導いた。

この関係式が暖地全般 (11~1 月平均気温平年値が 7.5°C を上回る 25 地点) に適用可能と仮定し、この関係に最も近い DTS とチルユニットの両方の積算値を実際に与える起算日を地点ごとに求め、起算日  $D_s$  とした。その後、この  $D_s$  について、簡単な気候ならびに地理的要素を説明変数とした 1 つの多項式を、重回帰分析を使って求めた。

以上の手順を経て、開花前年~開花年の気温によって求めたチルユニットの積算値からその年に必要な DTS

Table 1. Conversion of selected temperature to chill-units (Richardson *et al.*, 1974).

Temperature (°C)	Chill-unit contributed
-1.4	0.0
1.5-2.4	0.5
2.5-9.1	1.0
9.2-12.4	0.5
12.5-15.9	0.0
16.0-18.0	-0.5
18.0-	-1.0

積算値（ここでは  $DTS_{\text{a}}$  と記す）と、それぞれの地点の気候・地理的要素から求めた起算日  $D_s$  の推定値 ( $D_{\text{e}}$  と記す) とを求められるようにした。このようにすれば、開花前年～開花日までの気温推移さえ得られれば、暖地にあたる任意の地点でも休眠解除の遅速を考慮しながら開花日を推定できるようになると考え、上記の手順に基づいた具体的なモデルの作成と開花日の推定結果ならびに推定精度の考察を行った。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 モデル A

推定誤差を最も小さくした起算日  $D_s$  と平均積算値  $DTS_{\text{a}}$  との各地の組合せを Table 2 に示す。起算日  $D_s$  は東北地方で通日 20 日 (1 月中旬) 以前の早い地点が多いが、それより暖かい南の地方のほとんどの地点では  $D_s$  が通日 30～50 日 (2 月中・下旬) であった。11～1 月の平均気温平年値が 13.4℃ と解析地点の中で最も温暖な八丈島では、 $D_s$  が通日 55 日 (2 月 24 日) と最も遅くなった。Omoto and Aono (1989) は、この各地の起算日  $D_s$  が、開花に気温が影響し始める時期としている。一方、Goi (1982) や Hanaoka *et al.* (1980) によると、実際のサクラ類の休眠完了はもう少し早く、関東地方以南では 1 月上・中旬と見られる。この 2 つの時期には含まれた期間は休眠はほぼ完了しているものの、気温が低

いために生育がなかなか再開されない期間と考えられる。しかしながらこうした期間は冬が温暖な条件ほど、休眠完了が遅れることで短くなることが予想される。太平洋の沿岸各地や離島といった暖地では特にそれが顕著で、起算日  $D_s$  近くにならないと休眠完了が生じないことを示唆する研究事例もある (Aono and Omoto, 1990 a)。以上から本研究では、この起算日  $D_s$  を、暖地における休眠期とその後の生育期との間の境界の目安として取り扱う。

各地の推定開花日の RMSE を Fig. 2 に示す。東北から北陸地方の各地で 1～2 日の範囲、それ以南のほとんどの地点では 2～3 日の範囲となった。解析地点の中でもとりわけ温暖な八丈島や長崎、あるいは海岸沿いに位置する銚子や西郷では RMSE が 3 日を越える結果となった。Fig. 3 に開花日の推定精度の低かった銚子、八丈島、長崎の推定開花日の推移を示す。とりわけ八丈島では休眠解除の遅れ・進みの年々の変動が大きいと見られることから実際の開花日が 1 カ月近くの幅をもって変動するが、休眠解除を考慮しなかったモデル A の推定開花日にはほとんど変動がなく、まったく実際の開花日の変動を捉えていないことがわかる。また、銚子や長崎でも年によっては 10 日近い推定誤差が現れ、すべての年の開花日の変動を捉えきったとは言い難い結果となった。

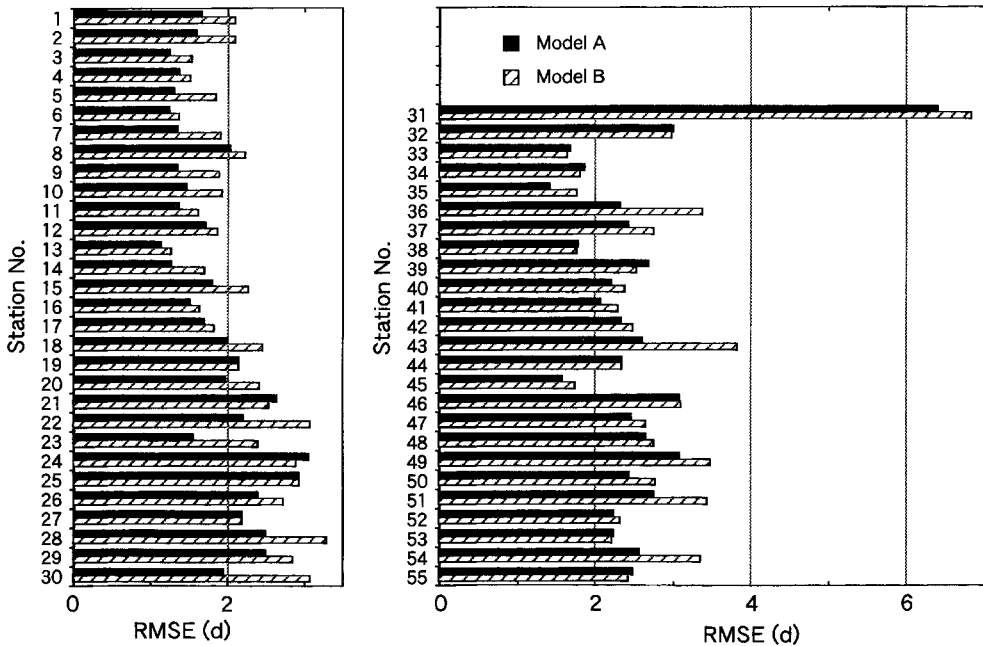


Fig. 2. Root mean square errors of the flowering dates estimated by use of models A and B.

### 3.2 モデル B

#### 3.2.1 全国共通の平均積算値 $DTS_m$

モデル A の解析時に作成した (起算日-平均積算値-開花日の RMSE) のデータセットを用いて、各地で一律の平均積算値とそれに対応する起算日とを推定に用いた場合における RMSE の 55 地点平均値が、どの平均積算値の場合に最も小さくなるかを調べた (Fig. 4)。その結果、全国一律で平均積算値を 23.8 日とした場合に 55 地点の RMSE の平均積算値が最小となった。以上の結果から、開花までに要する  $DTS$  積算値の全国一律の値、すなわち  $DTS_m$  として、23.8 日をモデル B に適用することにした。

#### 3.2.2 起算日の計算式

上記の  $DTS_m$  に対応する起算日  $D_m$  を、まず実際に前述のデータセットから求めた。そして、この  $D_m$  を計算できる多項式を重回帰分析から求めようとした。説明変数として、様々な期間について求めた平均気温の平年

値、緯度・経度、暖かさの指数、国土数値情報から計算可能な標高や海岸からの距離、開放度などの地形因子などを重回帰分析に用いた。こうした説明変数を自由度調整済み重相関係数 ( $R^*$ ) を参照して取捨選択しながら解析を進めた結果、以下の式 (2) が得られた。

$$D_{me} = 136.765 - 7.689\phi + 0.133\phi^2 - 1.307\ln L + 0.144T_F + 0.285T_F^2 \quad (R^* = 0.927) \quad (2)$$

ここで  $D_{me}$  は起算日  $D_m$  の推定値 (通日)、 $\phi$  は緯度 ( $^{\circ}N$ )、 $L$  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 ( $^{\circ}C$ ) である。本研究での解析では、 $T_F$ ,  $\phi$ ,  $L$  の順に  $D_m$  の変動に対する寄与が大きく、各説明変数の最大値と最小値を式 (2) に代入したときの  $D_{me}$  の変動幅はそれぞれ 35 日、17 日、6 日となる。起算日  $D_m$  が東北部のような寒冷地と九州や八丈島などの暖地双方で遅くなることを反映させるために、 $T_F$  と  $\phi$  についてはいずれも 2 次の項までを多項式に考慮した。また  $L$  の項の負の回帰係数は、内陸ほど起算日が早くなる傾向を反映したものである。起算日の少しの計算誤差でも開花日の推定誤差の増加につながるから、本研究では  $D_{me}$  をなるべく高い精度で推定できる多項式として式 (2) を採用した。しかし、解析地点の分布に大きく左右される緯度  $\phi$  を説明変数に用いることが妥当かどうか、また式 (2) に説明変数として用いた気温が果して 1~3 月の平均気温平年値でよいかなど、今後の検討課題として残っている。

Fig. 5 に、起算日  $D_m$  の実際の値と、式 (2) から求めたその推定値  $D_{me}$  との関係を示す。両者の最大のずれは最大で 4 日であった。図中の 1:1 の直線にプロットが集中しており、比較的正確に起算日を計算できることがわかった。

#### 3.2.3 モデル B による推定結果ならびに精度

Fig. 2 に示したモデル A と B による 55 地点の開花日の推定誤差 (RMSE) の比較によると、東北から北陸、山陰などの日本海側では、モデル A の代わりにモデル B を使うことによる RMSE の増加が 0.3 日以下に収まった地点がほとんどで、RMSE そのものも 1~2 日程度となった。一方、関東地方以西の太平洋沿岸から九州にかけては、モデル A と同様に、気候が温暖になるに従い、RMSE が大きくなる。55 地点中、最も温暖な八丈島では RMSE は 6.7 日ときわめて大きくなった。Fig. 3 の八丈島の推定結果を見ても、モデル A 同様に推定開花日が実際の開花日の変動をほとんど捉えていない。こうした例は他の暖地でも暖冬や逆に厳しい冬の後の開花年を中心に散見された。一般化されたモデルで暖地における推定精度を上げるためには、冬から春先にかけての休眠解除過程の考慮が必要であることが、モデル A、

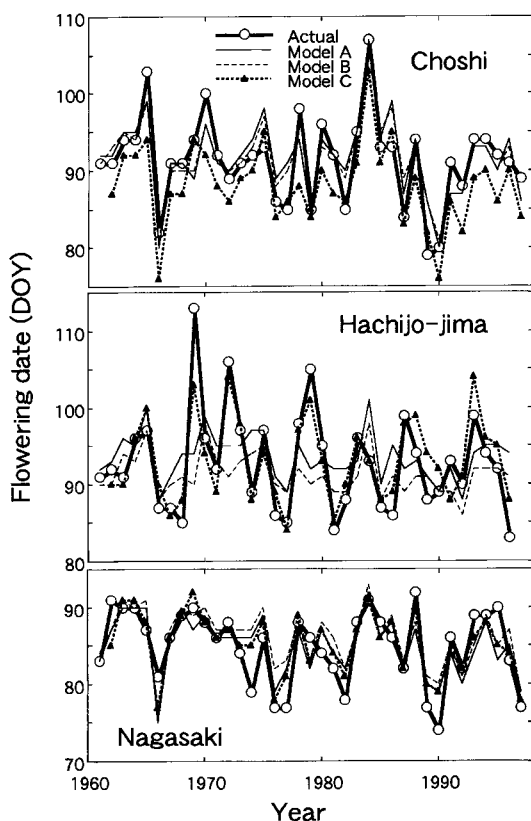


Fig. 3. Yearly variation of actual and estimated flowering dates of *Prunus yedoensis*. Estimated flowering dates deduced by the use of models A, B and C are shown.

Bの推定結果・精度の検討から改めて確かめられた。

### 3.3 モデルC

#### 3.3.1 暖地の目安の設定

休眠解除の影響を考慮しなくてよい(すなわち一般化モデルとしてモデルBを適用できる)地点か、休眠解除過程を考慮すべき(すなわちモデルCを適用すべき)地

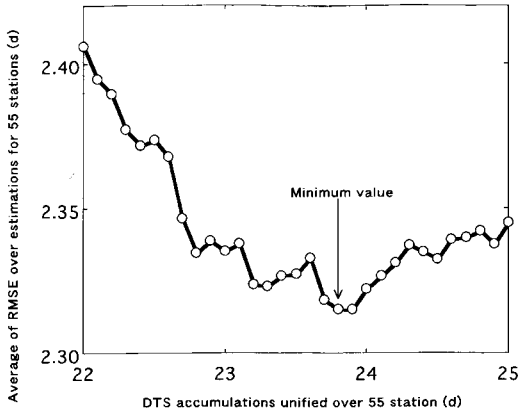


Fig. 4. RMSE averages over 55 stations, which were obtained from estimation with constant DTS accumulated value. The starting date at each station was determined as a corresponding value to each of the constant DTS accumulations, referring to the data set of the outputs from analysis for model A.

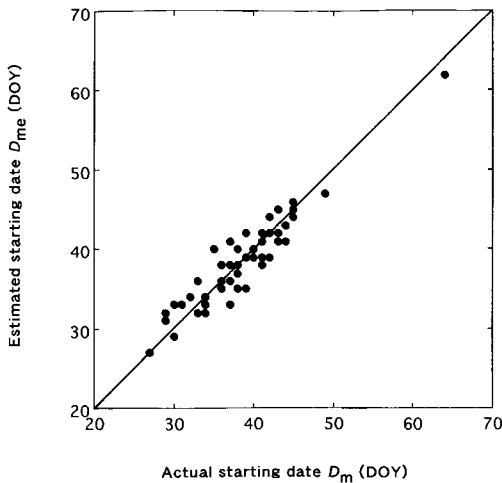


Fig. 5. Comparison of actual ( $D_m$ ) with estimated ( $D_{me}$ ) value of starting dates for DTS accumulation in model B. The starting date  $D_{me}$  was calculated by use of eq. (2).

点を判定する基準を、モデルCの解析に先だって決めることにした。暖地では温暖な冬の気温のために休眠解除がかなり遅くなることがあり、それに応じてDTSの平均積算値が多くなると考えられる。Table 2のモデルAにおける起算日 $D_s$ と平均積算値 $DTS_s$ を見ると、暖かい地域ほど $D_s$ は遅く、また $DTS_s$ は多くなる傾向が見られた。そこで本研究では、確実に暖地に位置しており、休眠解除の年々の遅速の影響の考慮が不可欠と判断される地点の基準として、Table 2中の $D_s$ が通日40日以降であり、なおかつ $DTS_s$ が24日以上となった地点とした。この基準に当てはまったのは敦賀、銚子、静岡、八丈島、下関、福岡、長崎の7地点であった。この7地点の中で、休眠解除過程に大きく関係する11~1月の3カ月間の平均気温の平年値が $7.5^{\circ}\text{C}$ と最も低かった敦賀を、本研究で取り扱う暖地の北限(最も寒い地点)と定義し、11~1月平均気温の平年値(Table 2中の $T_s$ )が $7.5^{\circ}\text{C}$ を上回る25地点(Fig. 1の黒丸で示した地点)を、休眠解除過程の考慮が必要な(つまりモデルCを適用すべき)地点として取り扱うことにした。

#### 3.3.2 チルユニットとDTS積算値との関係

前項で触れた、休眠解除過程の考慮が確実に必要と考えた敦賀、八丈島など7地点について、モデルAの起算日 $D_s$ 前日までに積算した年ごとのチルユニット積算値 $CU_s$ と、起算日 $D_s$ から実際の開花日までに積算された年ごとのDTSの積算値 $DTS_s$ との関係を求めた(Fig. 6)。異なる地点に関する値があるにもかかわらず、 $CU_s$ が少なくなる年や地点ほど開花までに多くの $DTS_s$ が必要となる傾向が明瞭に現れた。この関係を分析した結果、次の式(3)が得られた。

$$DTS_s = 58.56 - 4.467 \times 10^{-2} CU_s + 1.43 \times 10^{-3} CU_s^2 \quad (R=0.863) \quad (3)$$

こうした曲線が得られた最大の理由は、用いたモデルの起算日を年によって変化させないことにある。冬季の気温は通常、休眠解除の遅速に影響し、暖冬年ほど休眠の完了する時期が遅れる。たとえばSugiura and Honjo (1997)の行ったように休眠の完了した時期を気温経過からモデルで推定し、それ以後の気温経過を積算モデルに用いて落葉樹の開花日を推定する場合には、休眠完了から開花日までに必要となる積算値の年次間差は考慮されない。本研究のモデルでは地点ごとの起算日を年にかかわらず変えずに1つの値を用いるため、暖地の特に暖冬年ほど休眠完了以前におけるDTSの値も積算されることから、見掛け上、Fig. 6のような $DTS_s$ が増加する関係が得られたと考えられる。一方、冬が寒く $CU_s$ が多くなった年、とりわけ $CU_s$ が約1,500以上に達した場合には $DTS_s$ がほとんど変化していないように見える。

Table 2. The suitable values of starting date ( $D_s$ ) and DTS accumulations ( $DTS_s$ ) for model A, and other starting dates of  $D_{me}$  for model B and of  $D_{ce}$  for model C. The normals of averaged temperature over November–January  $T_a$  are also shown. Station numbers correspond to those in Fig. 1.

Station	$D_s$ (DOY)	$DTS_s$ (d)	$D_{me}$ (DOY)	$T_a$ (°C)	$D_{ce}$ (DOY)	Station	$D_s$ (DOY)	$DTS_s$ (d)	$D_{me}$ (DOY)	$T_a$ (°C)	$D_{ce}$ (DOY)
1. Aomori	22	27.1	42	1.8	—	29. Owase	47	22.4	43	8.8	41
2. Hachinohe	17	28.7	45	2.2	—	30. Yokohama	38	23.7	37	8.4	39
3. Akita	3	31.1	40	3.2	—	31. Hachijojima	55	30.4	64	13.4	53
4. Morioka	3	29.0	36	1.2	—	32. Saigo	38	23.8	37	7.2	—
5. Miyako	21	27.3	38	3.5	—	33. Yonago	38	24.0	38	7.2	—
6. Sakata	33	25.2	39	4.7	—	34. Tottori	35	24.6	37	7.1	—
7. Yamagata	14	26.5	29	2.7	—	35. Toyooka	45	21.0	34	6.0	—
8. Onahama	34	25.8	41	6.4	—	36. Hamada	40	23.5	39	8.7	40
9. Wajima	39	23.7	38	6.1	—	37. Kyoto	38	24.3	39	7.3	—
10. Aikawa	34	26.8	44	6.5	—	38. Hikone	45	20.4	33	6.5	—
11. Niigata	20	29.1	41	5.6	—	39. Shimonoseki	42	24.2	42	9.2	41
12. Toyama	35	24.5	38	5.8	—	40. Hiroshima	41	23.0	37	7.3	—
13. Nagano	23	25.1	30	2.6	—	41. Okayama	38	23.4	36	7.8	36
14. Takada	37	22.8	32	5.5	—	42. Osaka	38	25.9	43	8.8	38
15. Utsunomiya	40	21.2	29	4.9	—	43. Sumoto	39	22.7	35	8.2	39
16. Fukui	32	25.1	37	6.2	—	44. Wakayama	41	23.8	41	8.8	38
17. Matsumoto	9	27.4	27	2.5	—	45. Nara	37	23.0	34	6.6	—
18. Maebashi	39	21.6	31	6.2	—	46. Fukuoka	43	24.3	44	9.0	45
19. Mito	39	22.6	34	5.7	—	47. Saga	43	22.7	40	8.2	38
20. Tsuruga	40	24.8	42	7.5	42	48. Oita	43	22.6	40	8.6	40
21. Gifu	34	24.5	36	7.2	—	49. Nagasaki	43	24.1	43	9.6	42
22. Nagoya	37	22.7	33	7.1	—	50. Kumamoto	46	21.7	40	8.1	33
23. Kofu	39	21.5	30	5.3	—	51. Miyazaki	63	16.2	49	9.8	41
24. Choshi	40	26.0	45	9.3	39	52. Matsuyama	43	22.5	39	8.6	38
25. Tsu	40	23.8	40	7.8	39	53. Takamatsu	42	22.6	38	8.0	36
26. Hamamatsu	43	23.1	41	8.8	37	54. Kochi	49	19.7	39	8.8	35
27. Shizuoka	44	24.3	45	9.3	42	55. Tokushima	44	22.4	41	8.7	40
28. Tokyo	41	23.2	39	8.6	38						

また (3) 式は  $CU_w$  が 1,560 の場合に  $DTS_w$  の極小値 23.7 日を与えるが、この値はモデル B の  $DTS_m$  の値、すなわち 23.8 日に近い。そこで本研究では、たとえ休眠解除を考慮したモデル C であっても、式 (3) の  $DTS_w$  の極小値を与える  $CU_w$  (1,560) 以上の値が得られた年については、 $DTS_w$  として極小値の 23.7 日を等しく用いることにした。

### 3.3.3 起算日 $D_c$ の決定について

3.3.2 項の解析に用いた 7 地点以外の暖地を含めた計 25 地点について、式 (3) の  $CU_w$  と  $DTS_w$  の関係式に最も近い双方の積算値をもたらず起算日を  $D_c$  として改めて求めることにした。起算日前日までのチルユニットの積算値に基づいて、翌日の起算日から実際の開花日までに要する DTS 積算値を式 (3) を使って年ごとに推定し、開花日の計算に用いるという手順を、通日 1~70 日の 1 日間隔で起算日を変えながらすべての事例で繰り返し、1962~1990 年の 29 年間の推定開花日の RMSE

が最小となる起算日を選んだ。そしてこれを休眠を考慮した場合に適切な起算日  $D_c$  として用いることにした。起算日  $D_c$  は最も早かった高知で通日 27 日、最も遅かった八丈島では通日 52 日であったが、ほとんどの地点で通日 35~45 日の間となった。モデル A の起算日  $D_s$  と比較すると、早くなっている地点が多いものの、25 地点中、18 地点は 1~6 日程度の早まりにとどまり、全般的に大差はなかった。従って、起算日  $D_c$  は起算日  $D_s$  と同様に、休眠期間とその後の生育期間との境界の時期をおおよそ反映したものと考えられる。

モデルを一般化するためには、起算日を 1 つの多項式でなるだけ簡単に求められるようにしておく必要がある。暖地として取り扱った 25 地点について得られた  $D_c$  について、式 (2) を求めたときと同様の手順で重回帰分析を行った。その結果、以下の式 (4) が得られた。

$$D_{ce} = 3.913T_w - 1.33L - 34.64S + 20.10S^2 + 19.95 \quad (R^* = 0.78) \quad (4)$$

ここで  $D_{ce}$  は起算日  $D_c$  の推定値 (通日),  $T_w$  は, 12月, 1月, 2月の平均気温の平年値 (°C),  $L$  は海岸からの距離 (km),  $S$  は観測点を中心にした 31 km 四方 (国土数値情報第三次地域区画メッシュで 31 メッシュ四方) における海域の占める割合である。式 (4) では  $T_w$  については正の係数,  $L$  については負の係数,  $S$  については二次の項まで考慮したが, これは起算日  $D_c$  が, 暖かい沿岸, しかも半島の先や離島にある地点ほど遅れる傾向があることを反映しようとしたことによる。25 地点の  $D_c$  と  $D_{ce}$  との関係を確かめた結果, RMSE は 2.5 日であったことから, 比較的正確に起算日を式 (4) によって推定できたものと判断した。式 (4) から計算した各地の起算日  $D_{ce}$  の値は Table 2 に示したとおりである。なお, 本研究では起算日  $D_c$  とその相関に最も寄与した気温の変数として 12~2月の平均気温平年値を選んだが, この期間の平均気温を起算日  $D_c$  の算出に使うことが適切かについてはさらなる精査を要する。

3.3.4 モデル C による開花日推定結果

以上に述べたように, 式 (4) によって求められた起算日  $D_{ce}$  と,  $D_{ce}$  前日までの毎年のチルユニット積算値 ( $CU_{ci}$  として記す), そしてこの  $CU_{ci}$  から式 (3) を使って求めた開花までに要する年ごとの DTS 積算値 ( $DTS_{ci}$  と記す) を用いて, 暖地にあたる地点の開花日の推定を試み, これまで述べた 2 つのモデルによる推定結果・推定精度を比較した。3 つのモデルによる開花日の推定誤差 (RMSE) を Table 3 に示す。全体的に見ると, 25 地点平均の RMSE はモデル A の場合には 2.7 日, これに対してモデル B では 3.0 日となり, モデルの一般化に伴って推定誤差は増加した。同じ一般化された

モデルでも休眠解除過程を考慮したモデル C ではこれが 2.8 日となり, モデルの一般化による誤差の増加を多少なりとも抑えたといえることができる。

休眠解除の年ごとの遅速の影響が, 開花日の推定精度に最も影響し, モデル B で RMSE が 6.7 日と最大となった八丈島では, モデル C の適用により RMSE が 3.1 日まで減少した。この他の地点でも, 長崎ではモデル B に対してモデル C で RMSE が 0.5 日減少するなど, 25 地点のうち過半数の 14 地点でモデル B に比べ C で RMSE が減少した。Fig. 3 の推定開花日の推移に関する八丈島や長崎の例を見ても, モデル A や B では推定できなかった大きな変動を伴う年の開花日に, モデル C の推定開花日がかなり近づいていることがわかる。これらの地点では, 休眠後の生育期間中の気温だけでは捉えることのできない休眠解除の遅速の影響による実際の開花日の大きな変動についてもモデル C で捉えられたことから, モデルの一般化による開花日の推定精度の減少を抑えたことができたといえる。

一方, モデル C の適用によってモデル B より開花日の推定誤差がかなり大きく増加した地点は銚子 (RMSE

Table 3. Root mean square error (RMSE) in estimation of flowering dates in the warm region of Japan, applying models A, B and C.

Station	Root mean square error (d)		
	Model A	Model B	Model C
20. Tsuruga	2.0	2.2	2.1
24. Choshi	3.1	3.1	4.3
25. Tsu	2.9	3.0	2.9
26. Hamamatsu	2.4	2.6	3.1
27. Shizuoka	2.2	2.2	2.0
28. Tokyo	2.5	2.5	2.1
29. Owase	2.5	2.7	2.6
30. Yokohama	2.0	2.0	2.1
31. Hachijo-jima	6.4	6.7	3.1
36. Hamada	2.3	2.4	2.6
39. Shimonoseki	2.7	2.7	2.8
41. Okayama	2.1	2.3	2.9
42. Osaka	2.4	2.5	3.4
43. Sumoto	2.6	2.7	3.4
44. Wakayama	2.4	2.4	2.4
46. Fukuoka	3.1	3.2	3.3
47. Saga	2.5	2.9	2.8
48. Oita	2.7	2.9	3.0
49. Nagasaki	3.1	3.1	2.6
50. Kumamoto	2.5	2.8	2.6
51. Miyazaki	2.8	3.1	3.4
52. Matsuyama	2.2	2.5	2.4
53. Takamatsu	2.3	2.3	2.4
54. Kochi	2.6	2.9	3.2
55. Tokushima	2.5	2.7	2.4

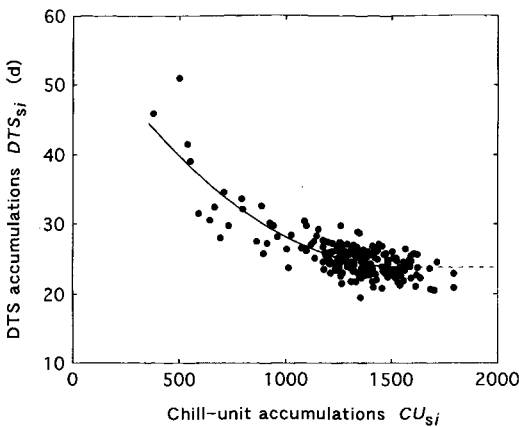


Fig. 6. Relationship between  $DTS_{ci}$  and  $CU_{ci}$ . Solid line means the relation of eq. (3) and broken line means 23.7 d of DTS accumulations.

の増加は 1.2 日), 大阪 (同じく 0.9 日), 洲本 (同じく 0.7 日) であった。この原因は, 式 (4) における起算日  $D_{cc}$  の計算誤差に起因するものであった。Fig. 3 の銚子における推定結果を見ると, モデル C による推定開花日が全般に早いことがわかるが, これは式 (4) による起算日  $D_{cc}$  が早めに推定されたことによる。銚子では, 過去のデータを解析的に用いて求めた  $D_c$  が通日 43 日であるのに対し, 式 (4) による推定値  $D_{cc}$  は通日 39 日と 4 日の誤差が現れた。また大阪でも両者の差は 4 日, 洲本では 5 日となりいずれも大きい。モデル C に用いるべき起算日  $D_{cc}$  の計算誤差が開花日の推定精度に与える影響をこれらの地点について調べてみると, 銚子で 1.3 日, 大阪で 1.2 日, 洲本で 0.8 日の RMSE の増加をもたらしたことがわかった。これらの地点でのモデル C による推定精度の向上のためには, 起算日  $D_{cc}$  を求めるための式 (4) について, 回帰分析に用いる説明変数などをさらに検討する必要があることが考えられる。

### 3.3.5 モデル C の検証

これまでモデルの作成に用いてきた地点以外についても, 各モデルが適用可能かを確かめる目的で, 3.3.1 項で述べた暖地としての条件 (11~1 月の平均気温の平年値が 7.5°C 以上) に当てはまる 6 地点の気象官署 (Fig. 1 中の A~F) を選択し, ソメイヨシノの開花日の推定に各モデルを適用して精度を比較することにした。

Table 4 に, これらの 6 地点について, 各モデルに用いた起算日と開花日の推定誤差 (RMSE) を示す。モデル A の開花日の RMSE は最小の地点で 2.9 日 (福江), 最大の地点では 6.9 日 (種子島) であった。一方, 一般化後のモデル B ではモデル A の場合に比べて, いずれの地点でも RMSE は増加し 3.0~10.2 日の範囲となった。休眠解除を考慮したモデル C を適用した場合には, 6 地点のうち 4 地点で RMSE がモデル B の場合に比べて 0.4~1.1 日減少した。特に潮岬や福江では, 一般化する前のモデル A よりも RMSE が少なくなり, 休眠解除

過程を考慮したことによる開花日の推定精度がかなり改善された。しかしながらこれら 6 地点のうち, 最も温暖な種子島ではモデル C の適用によって逆に RMSE がモデル B の場合に比べて 3.2 日増加し, 13.2 日となった。

モデル B, C による開花日の推定結果の例を Fig. 7 に示す。ここに挙げた暖地の 4 地点では, 冬季の気温が左右する休眠解除の遅れ・進みと, 2 月下旬以降の気温が影響する生育の遅速, 双方の年による違いの影響を大きく受けるので, 相対的に大きく変動する傾向にある。休眠解除過程を考慮していないモデル B の推定開花日は, 種子島以外の場合には比較的实际の開花日の推移に近い年も多いが, 詳細に調べると潮岬の 1974 年, 1985 年, 宇和島の 1974 年, 1989 年, 1990 年, 大島の 1966 年や 1989 年など, 特に開花日が大きく変化した年には推定誤差が 10 日前後になる場合も見られた。また, 種子島では実際の開花日に比べて推定開花日の変動がはるかに小さく, モデル B ではほとんど開花日の推定が不可能のように見える。

一方, モデル C による推定開花日の推移を見てみると種子島以外については, 上に述べた年については誤差が少なくなり, 実際の開花日の推移にかなり近づいた。種子島については実際の開花日の推移に比較的類似したパターンの推定開花日の推移が得られたものの, 全体的に推定開花日の方が遅くなる結果となった。前項で述べたように, Fig. 3 の銚子の例では起算日  $D_{cc}$  の計算値が実際の開花日  $D_c$  より 4 日早くなったことによって, モデル C による推定開花日が実際より早目にシフトした。この種子島の例は逆にモデル C による推定開花日が遅れる方向にシフトしていることから, 銚子とは逆に起算日  $D_{cc}$  の計算値が遅くなったことによると考え, 解析を通してそれを確かめようとした。しかしながら, 種子島の場合にはモデル C において起算日をいくらずも早目に設定しても RMSE が 13 日を下回ることはなかった。

Table 4. Results of the verification for models A, B and C using temperature and flowering dates from six stations in the warm region of Japan. RMSEs were calculated over the periods of 1961-90 for models A and B, and 1962-90 for model C.

Station	Model A		Model B		Model C	
	$D_s$ (DOY)	RMSE (d)	$D_{mc}$ (DOY)	RMSE (d)	$D_{cc}$ (DOY)	RMSE (d)
A. Oh-shima	45	2.6	43	3.1	40	2.6
B. Shionomisaki	47	3.2	51	3.3	45	2.3
C. Nobeoka	45	3.7	44	4.2	40	4.2
D. Tanega-shima	46	6.9	70	10.2	58	13.2
E. Fukue	48	3.0	47	3.0	45	2.8
F. Uwajima	47	3.0	42	3.7	39	3.0

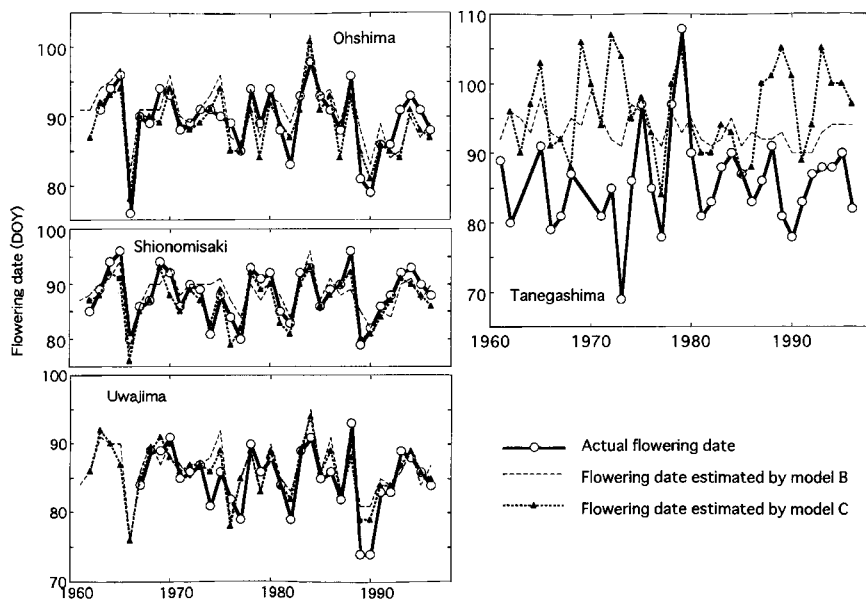


Fig. 7. Yearly variation of actual and estimated flowering dates at the station, which was selected from the warm region of Japan for the purpose of verification for models.

従って、種子島の場合は起算日の計算誤差以外の理由から開花日の推定精度が低下したと考えられる。

本研究のモデル作成で用いた 55 地点のうち、最も温暖な八丈島の冬季 (12~2 月) の平均気温は平年で  $11.1^{\circ}\text{C}$  であるが、種子島の場合にはそれよりもさらに  $1^{\circ}\text{C}$  高く、ソメイヨシノの休眠を完了させる低温条件としてはかなり限界に近いものと考えられる。落葉樹が極めて暖かい気候条件下に置かれた場合、休眠完了に必要な低温遭遇の時間数が少なくなったり、また、寒冷な地方で認められるよりも相対的に高い気温条件下でも休眠完了が起きることがしばしば報告されている (たとえば Perry and Wang, 1960; Balandier *et al.*, 1993)。本研究で求めた、休眠に有効な低温時間数 (チルユニット) と生育に必要な DTS の間の関係は、式 (3) を導くの用に用いた地点のある西日本から八丈島では適用可能なように思われるが、種子島のように休眠解除の点で生存南限と見られるような極めて温暖な地域では、冬に受けた低温から式 (3) で推定されるほど多くの DTS は実際には必要ないことも予想される。気候の温暖化が落葉樹の生育にどのように影響するかについて予想する場合、特に生存南限付近での休眠時の感温特性の変化を把握することも重要となるであろう。

今回、休眠解除の遅速の指標として用いたチルユニットは、Richardson *et al.* (1974) がモモの休眠解除に対する感温特性をもとに提案したものである。このチルユ

ニットのもとになった休眠解除に関わる感温特性はソメイヨシノのものと変わらないと本研究では仮定し、モデル C に組み込んだ。生存南限に極めて近い地域を含めた暖地全体の中で、休眠中のソメイヨシノの感温特性が今回用いたチルユニットのもとになる感温特性に近いのか、休眠中の感温特性に地域差があるか、さらに感温特性に地域差が無くても低温要求に地域差があるかについて、さらに検討を要する点が多いといえる。

#### 4. ま と め

これまでの温度変換日数法 (DTS 法) では、過去複数年の実際の開花と気温のデータの解析を必要としたが、本研究では、気候影響の評価にも応用できるようにする目的で、過去複数年分の開花日と気温のデータが無い地点でもソメイヨシノの開花日の推定が可能になるような一般化モデルの作成を試みた。特に暖地では、開花前年の秋から開花年の春先にかけて起きる休眠解除過程をモデルの一般化にどのように考慮させるかについても検討した。ここで作成したモデルは、開花前年秋季以降、開花時期前後までの気温推移さえ得られれば適用可能となるものである。

この一般化モデルを実際に適用する場合、まず 11~1 月の平均気温平年値が  $7.5^{\circ}\text{C}$  以上の暖地かどうかを判定する。暖地でないと判定された地点については、緯度や海岸からの距離、1~3 月の平均気温平年値から多項式

(式 (2)) を使って求めた起算日  $D_{mc}$  と、一律に定めた DTS 積算値 (23.8 日) をモデルに適用することになる。この一般化モデルでは、休眠解除過程は考慮されないが、東北から北信越、北関東の多くの地点では、この一般化モデルで RMSE が 2 日以下となり、かなり精度の高い推定が可能になったことがわかった。

一方、暖地と判断された地点については、i) 起算日を 12~2 月の平均気温平年値と、海岸からの距離、海洋度といった地形因子から式 (4) により求める、ii) 注目年の休眠解除過程の遅速を表すチルユニットの積算値を上記の起算日前日までについて求める、iii) その年の開花までに必要と見込まれる DTS 積算値を、上記のチルユニット積算値から式 (3) を使って求める、iv) 毎日の日平均気温を使って計算した DTS を起算日から積算し、これがその年に見込まれる DTS 積算値に達した日を推定開花日とする、という手順を経ることになる。

既往のモデル、休眠解除過程を考慮した暖地用の一般化モデルと、休眠解除を考慮しない暖地以外のための一般化モデルの 3 種類を、暖地と判断した各地点について適用し、休眠を考慮したことによる推定結果・精度への効果について検証した。既往のモデルでは推定誤差が暖地の解析地点全体で平均して RMSE で 2.7 日、これに対して休眠を考慮しなかった一般化モデルで 3.0 日と精度は低下した。一方の休眠解除過程を考慮した一般化モデルではこれが 2.8 日となり、一般化に伴う推定誤差の増加を多少なりとも減少させた。ソメイヨシノの生育場所としては非常に暖かい八丈島では、実際の開花日の大きな変動を、休眠を考慮した一般化モデルによる推定開花日がよく捉えることができ、既往のモデルの場合よりも 3 日以上、RMSE を減少させることができた。

しかしながら、たとえ暖地であっても、休眠解除を考慮した一般化モデルの適用によって、かえって誤差が増加した地点が見られた。誤差増加の原因としては、DTS の起算日の計算精度があまりよくないことがまず考えられた。加えて、今回用いたチルユニットを暖地に位置するすべての地点のソメイヨシノにそのまま適用してよいかといった低温評価の方法の再検討も必要である。仮に地域ごとに休眠期間中の感温特性の違いを見いだせれば、これをモデルに組み込むことでさらに推定精度の向上が期待できる。暖地用のモデルの一般化で残った上記の課題をクリアでき、暖地以外のための一般化モデルと組み合わせれば、相応の評価精度が期待できるようなメッシュベースの開花日分布の推定あるいは植物の生育の気候影響評価への応用も可能になるであろう。

## References

- Aono, Y. and Omoto, Y., 1990 a: Estimation of blooming date for *Prunus yedoensis* using DTS combined with chill-unit accumulation. *J. Agric. Meteorol.*, **45**, 243-249 (in Japanese with English abstract).
- Aono, Y. and Omoto, Y., 1990 b: A simplified method for estimation of blooming date for the cherry by means of DTS. *J. Agric. Meteorol.*, **46**, 147-151 (in Japanese with English abstract).
- Aono, Y. and Omoto, Y., 1992: Estimation of blooming dates of *Rhododendron kaempferi*, *Wisteria floribunda* and *Hydrangea macrophylla*. *J. Agric. Meteorol.*, **47**, 233-240 (in Japanese with English abstract).
- Aono, Y. and Sato, K., 1996: Estimation of flowering date for Japanese apricot tree (*Prunus mume*) in western Japan considering both processes of rest break and development. *J. Agric. Meteorol.*, **52**, 125-134 (in Japanese with English abstract).
- Balandier, P., Bonhomme, M., Rageau, R., Capitan, F. and Parisot, E., 1993: Leaf bud endodormancy release in peach trees: Evaluation of temperature models in temperate and tropical climates. *Agric. For. Meteorol.*, **67**, 95-113.
- Ebata, M. and Ishikawa, M., 1987: Phenology and growing degree days: Analysis of flowering date for cherry tree (*Prunus yedoensis*) in Nagoya. *Mag. Tokai Branch Soc. Agric. Meteorol. Jpn.*, **45**, 27-29 (江幡守衛・石川雅士, 1987: 植物季節と有効積算気温一名古屋におけるソメイヨシノの開花について。日本農業気象学会東海支部会誌, **45**, 27-29) (in Japanese).
- Fushiki Weather Station, 1953: On the relation between cherry blooming day and weather elements at Fushiki. *J. Meteorol. Res.*, **5**, 147-158 (in Japanese with English abstract).
- Goi, M., 1982: Studies on the flower formation and forcing of some ornamental trees and shrubs native to east Asia. *Mem. Fac. Agric. Kagawa Univ.*, **38**, 1-120 (in Japanese with English abstract).
- Hanaoka, Y., Motegi, T. and Mori, A., 1980: Ecological studies on flowering trees and shrubs at the regions of different altitude: II, On *Prunus subhirtella* Miq., *Prunus Perusica* Batsch, *Prunus Mume* Sieb. et Zucc. *Bull. Gunma Hort. Exp. Stn.*, **8**, 1-18 (in Japanese).
- Ito, D., 1991: A sprouting model in mulberry: From dormancy awakening based on reaction kinetics. *Jpn. J. Crop Sci.*, **60**, 47-56 (in Japanese with English abstract).
- Kai, K., Kainuma, M., Murakoshi, N. and Omasa, K., 1993: Potential effects on the phenological

- observation of plants by global warming in Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **48**, 771-774.
- Koma, S., 1953: Studies on the rest period of deciduous fruit trees: On the beginning, the ending and the depth of the rest period. *J. Fac. Agric. Shinshu Univ.*, **3**, 189-204 (in Japanese).
- Konno, T. and Sugihara, S., 1986: Temperature index for characterizing biological activity in soil and its application to decomposition of soil organic matter. *Bull. Nat. Inst. Agro-Environ. Sci.*, **1**, 51-68 (in Japanese with English abstract).
- Kumano, Y., 1957: On the forecast of the flowering and full-bloom dates of the cherry-tree (*P. yedoensis*) at Shimonoseki. *Mem. Indust. Meteorol.*, **20**, 75-78 (in Japanese with English abstract).
- Lindsey, A. A., 1963: Accuracy of duration temperature summing and its use for *Prunus serrulata*. *Ecology*, **44**, 149-151.
- Murray, M. B., Cannell, M. G. R. and Smith, R. I., 1989: Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. *J. Appl. Ecol.*, **26**, 693-700.
- Omoto, Y. and Aono, Y., 1989: Estimation of blooming date for *Prunus yedoensis* by means of kinetic method. *J. Agric. Meteorol.*, **45**, 25-31 (in Japanese with English abstract).
- Perry, T. O. and Wang, C. W., 1960: Genetic variation in the winter chilling requirement for date of dormancy break for *Acer rubrum*. *Ecology*, **41**, 790-794.
- Richardson, E. A., Seeley, S. D. and Walker, D. R., 1974: A model for estimating the completion of rest for 'Redhaven' and 'Elberta' peach trees. *Hortscience*, **9**, 331-332.
- Sakai, Y. and Kawahara, R., 1952: The forecast of the first flowering date of the cherry-blossom in Tokyo. *Mem. Indust. Meteorol.*, **16**, 65-69 (in Japanese with English abstract).
- Shaltout, A. D. and Unrath, C. R., 1983: Rest completion prediction model for 'Starkrimson Delicious' apples. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, **108**, 957-961.
- Sugiura, T. and Honjo, H., 1997: A dynamic model for predicting the flowering date developed using an endodormancy break model and a flower bud development model in Japanese pear. *J. Agric. Meteorol.*, **52**, 887-900.
- Weinberger, J. H., 1950: Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, **56**, 122-128.