



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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2010-12-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 青野, 靖之, 佐藤, 和美 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10466/11161

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

青野 靖之・佐藤 和美*

(大阪府立大学農学部大気環境学研究室)

Estimation of Flowering Date for Japanese Apricot Tree
(*Prunus mume*) in Western Japan Considering Both
Processes of Rest Break and Development

Yasuyuki AONO and Kazumi SATO

(Lab. of Atmospheric Environment, College of Agriculture,
Osaka Prefecture University, Gakuen-cho 1-1, Sakai, 593 Japan)

Abstract

The flowering dates of Japanese apricot trees (*Prunus mume*) at 15 meteorological stations in western Japan are estimated, considering processes both of rest breaking and developing of flower bud. As the basis of estimation, accumulation model using an exponential function of daily mean temperature, so called DTS (the number of days transformed to standard temperature) method, is used for expressing development of flower bud. In this study, it is assumed that flower bud with more advanced rest break obtains greater responsiveness to DTS value. The degree of rest break on each day is quantified as the accumulations of values computed by another exponential function of hourly chilling temperature, and expressed in an index ranged from 0 to 1. Daily DTS value multiplied by the index of degree of rest break is accumulated, and the date, on which its accumulations reach to their mean value required for flowering, is determined as the estimated flowering date.

Due to estimate flowering date accurately, it is necessary to determine the most suitable combination of three parameters in the exponential function of chilling temperature at each station. These parameters represent the point when chilling temperature starts to affect in breaking the rest of flower bud, the optimum temperature to break the rest and the point when rest completes, respectively. Most suitable combination of parameters for each station shows that the rest break of flower bud initiates in late-October and almost completes during the period since late-November until mid-December.

By taking account of the process of rest break into the estimation of flowering date using DTS-method, the part of errors attributed by yearly variation in the succession of rest break process is decreased considerably. The root mean square errors in estimations with corrections considering rest break processes fall within the range of 5-10 days, whereas those without corrections correspond to the range of 7-12 days. Estimation methods with considerations of rest break processes generally account for 70-90% of the variances in actual flowering dates of Japanese apricot.

Key words: DTS-method, Estimation of flowering date, Japanese apricot tree (*Prunus mume*), Rest break process.

キーワード: ウメ, 温度変換日数法, 開花日の推定, 休眠解除過程

1995年7月27日 全国大会にて発表

1995年8月14日 受付, 1996年2月20日 受理

* 現在: 日本振興株式会社名古屋支店

1. はじめに

ウメの開花時期についてはこれまでに、栽培管理あるいは適地適作を目的とした解析(中川ら, 1966; 渡辺ら, 1975), あるいは気候学的な見地の解析(小池, 1941; Shigehara *et al.*, 1991; Kai *et al.*, 1993)がいくつか試みられた。これらの結果は、ウメの開花時期がほぼ12月以降の比較的長い期間(野梅性: 純粋梅に近い場合)の気温に大きく影響されることを示している。

ところでウメは開花前年の夏季に花芽分化した後、10月頃の雌ざい形成後、自発休眠期に至る(江口, 1931; 花岡ら, 1980)。ウメの場合も他の落葉果樹・花木と同様に、秋～冬季の低温を受けることにより休眠明けを迎える(五井, 1982)。ところでFelker and Robitaille (1985)は、自発休眠について、気温に対する花芽発達への応答が増加していくという形で、次第に終了するものとしている。観賞用のウメの場合、休眠解除が進んで、実用的な開花率の得られる開花促成が可能になる時点が休眠明けの時期とするのが一般的である。しかしその休眠明け前後の期間には、開花率が長期にわたり緩やかに増加するなど、花芽における休眠の影響が緩慢に減少し続けることが示されている(花岡ら, 1980)。ソメイヨシノやモモなどの場合、休眠明け後も気温が低く花芽の発達がほとんど進まない他発休眠期が1～2ヶ月間存在し、その間に低温量による自発休眠解除の進み具合の年次間差がかなり縮小すると見られる。しかし、気温の低い季節でも開花するような早咲きの、暖地における野梅性のウメの場合は、上に述べた理由から他発休眠期がかなり短いと推察される。

ウメの開花日の年々の変動幅は一般に1～2ヶ月であるが、他発休眠期が短いとすれば、こうした大きな変動のかなりの部分は、年ごとの自発休眠の解除の進み具合の差が原因で生じている可能性もある。ウメの開花期を高い精度で推定するには、休眠期から開花期までの長期にわたる気温を使用しながら、緩慢で、年ごとに進みのかかなり異なる休眠解除の推移(言いかえれば、花芽発達の気温への応答の増加の推移)を連続して捉える方法を採用する必要がある。

これまでにソメイヨシノの開花日の推定の際に、花芽発達期の他に自発休眠期の気温を考慮した例がある(江幡・石川, 1987; 青野・小元, 1990aなど)。これらの研究では、冬季のある決まった期間の低温量を使って、休眠後の花芽発達期における気温(またはそれを用いた指数)の積算値が年ごとに補正された。この補正方法では休眠解除の進み具合による気温の積算値の変動と相関の高い低温量の得られる期間を設定する必要がある。

しかしながら、ウメなど年ごとに休眠解除の進み具合が緩慢で大きく異なる種については、仮にそうした期間が統計上得られても、その期間の終わりが積算気温の計算日の後になることで、花芽発達の期間と重なることも多く、この補正方法をそのままウメの開花日の推定に使用し難い。その上、自発休眠中のウメの感温特性自体についてもほとんど明らかとなっていない。

最近、伊藤(1991)は自発休眠過程を考慮したクワの萌芽日の計算モデルを開発した。このモデルでは、葉芽の自発休眠から萌芽への過程の変化やその進み具合を気温を用いて連続的に表すことができ、またパラメータにより適温の異なる休眠期の感温特性を説明することができる。これらを応用し、休眠中のウメの感温特性を改めて評価することによって、年により時期が異なる自発休眠から花芽発達への緩慢な移行を、開花日の推定モデルに組み入れることができると考えられる。

本研究では、西日本を対象に気温のみを使って、主に観賞用に用いられる野梅性のウメの開花日について、精度の高い推定方法の開発を試みる。推定方法は、小野ら(1987, 1988a, b), 山田ら(1988), 小野・金野(1990), 青野・小元(1990a, b, 1992)が各種落葉果樹・花木の開花日の推定に用いてきた温度変換日数法が基本となる。そして上記の伊藤(1991)によるモデルを応用し、推定に用いる温度変換日数を補正することによって、前に述べたような特徴を持つウメの自発休眠期の感温特性を考慮する。

2. データ及び解析方法

2.1 開花・気温データ

本研究では、開花時期が総じて早く、また暖冬年には休眠解除の遅速の影響が開花時期まで残る可能性のある西日本の15地点を対象として選んだ(Fig.1)。開花日のデータには気象官署による生物季節観測値を、気温のデータにはアメダスによる特別値をそれぞれ用いた。解析期間は1977～91年(開花年)の15年間とした。

気象庁の生物季節観測指針には、ウメの観測対象品種について、単に白梅(豊後系を除く)とあり、特に指定されていない。本研究では各気象官署に品種の照会を試みたが、結局、和歌山(冬至: 野梅性)以外は不明であった。ところで、各地の平均開花日は1月中旬～2月中旬であるので、各地のウメは極早咲きあるいは早咲きの品種とみられる。塚本(1988)によると、白梅の内、こうした品種のほとんどは野梅性に該当するとされていることから、本研究の対象とする地点の大部分の品種は、アンズとの交雑種ではなく、純粋梅に近いタイプの野梅性に属していると思われたい。

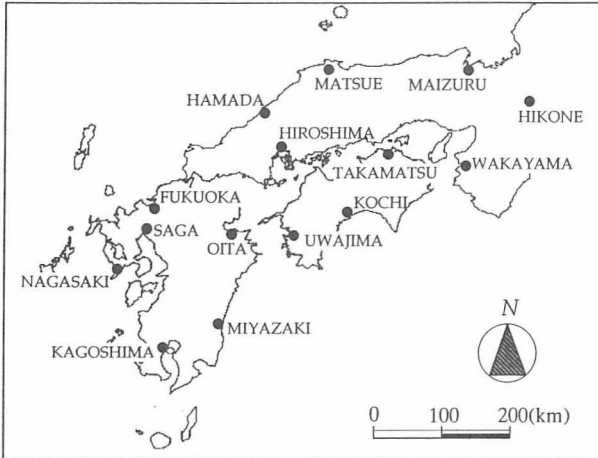


Fig. 1. Map showing meteorological stations used in this study.

なお、本研究では気温を用いた解析を、開花前年に行うことになる。したがって、本研究ではこれ以降、開花日などの日付を便宜上、開花前年の9月1日を1日目として数えた通日で表す。

2.2 通常の温度変換日数法による開花日の推定方法

本研究では、従来より用いられてきた温度変換日数法に基づいて開花日を推定し、後に述べる自発休眠解除を考慮した方法による推定精度と比較する。

温度変換日数は、ある標準温度の下での植物の生育または生長などの1日分の量に対する、毎日の気温条件下での1日当りの量の相対値を示すものである。各地点のアメダスによる日平均気温(時別値の平均値)の絶対温度が T_{ij} Kである*i*年*j*日については、温度変換日数(t_s)_{ij}が次式で計算される。

$$(t_s)_{ij} = \exp \{ E_a (T_{ij} - T_s) / RT_{ij} T_s \} \quad (1)$$

ここで E_a は温度特性値(J mol⁻¹)、 R はモル気体定数(8.314 JK⁻¹ mol⁻¹)、 T_s は標準温度(K)で本研究では288 K(15°C)を使用した。開花日を推定するには、まず(1)式の(t_s)_{ij}を、ある起算日(D_s)から各年の開花日(B_i)まで積算した平均値(\overline{DTS})を以下の様に求める。

$$\overline{DTS} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=D_s}^{B_i} (t_s)_{ij} / N \quad (2)$$

ここで N は解析年数(本研究では15年間)である。そしてこの起算日 D_s 以降についてもう一度(t_s)_{ij}を積算し、 \overline{DTS} に達した日を推定開花日とした。

開花日を高い精度で推定するには、(1)式の温度特性値 E_a と(2)式の起算日 D_s の適切な値を求める必要がある。本研究では起算日を通日51日~130日の範囲(1日

間隔)、 E_a を20~120 kJ mol⁻¹の範囲(4 kJ mol⁻¹間隔)に条件設定し、全ての組合せを用いて1977~91年のウメの開花日の推定誤差(RMSE)を算出した。RMSEは推定開花日を B_{e_i} とした場合、以下の式で計算される。

$$(RMSE) = \left\{ \sum_{i=1}^N (B_i - B_{e_i})^2 / N \right\}^{1/2} \quad (3)$$

これらの推定結果の中からRMSEが最も少なくなる場合の D_s と E_a の組合せを選び、適切なパラメータとした。

2.3 休眠解除を考慮した温度変換日数の補正值による開花日の推定方法

休眠解除の遅速を定量的に把握するには、休眠解除に効果的な低温量を評価する必要がある。こうした低温量の表現法にはWeinberger(1950)、Eggert(1951)、高馬(1953)などが用いた7.2°C以下の積算時数、Richardson *et al.* (1974)やShaltout and Unrath(1983)が提案したチルユニットなどがある。しかしウメの休眠時の感温特性についてはこれまでほとんど分かっておらず、ウメの休眠に対する低温の効果を変えて検討する必要がある。そこで本研究では、休眠解除の進み具合を表す方法として、伊藤(1991)がクワの休眠解除の感温特性を説明するのに用いた指数関数を使用することにした。

この指数関数では休眠解除への適温や上限温度を任意に設定できる。*i*年*j*日*k*時台の1時間に休眠解除が進む速度 v_{ijk} の温度に対する相対的变化は次の関数で表せると考える。

$$v_{ijk} = \exp(-B/T_{ijk}) - \exp(-C/T_{ijk} + Q) \quad (4)$$

$$B = C - T_u Q \quad (5)$$

$$C = T_u Q \exp(T_u Q / T_0 - Q) / \{ \exp(T_u Q / T_0 - Q) - 1 \} \quad (6)$$

ここで B 、 C 、 Q はパラメータ、 T_{ijk} は*i*年*j*日*k*時のアメダスによる気温の観測値(K)、 T_u は休眠解除への感温特性における上限温度(K)、 T_0 は同じく休眠解除への感温特性における最適温度(K)である。 Q の値については、伊藤(1991)がクワの萌芽日の計算の際に検討し、 Q の値自体は推定精度をそれほど左右しないものの、10を適切な値と判断したので、この値を本研究でもそのまま用いる。また上限温度 T_u については、Shaltout and Unrath(1983)やFelker and Robitaille(1985)が、バラ科果樹の休眠解除に効果のある温度の上限と見なした15°C(288 K)を用いる。Fig.2に最適温度 T_0 別に、 T_{ijk} による v_{ijk} の相対的な変化の仕方を示す。 v_{ijk}

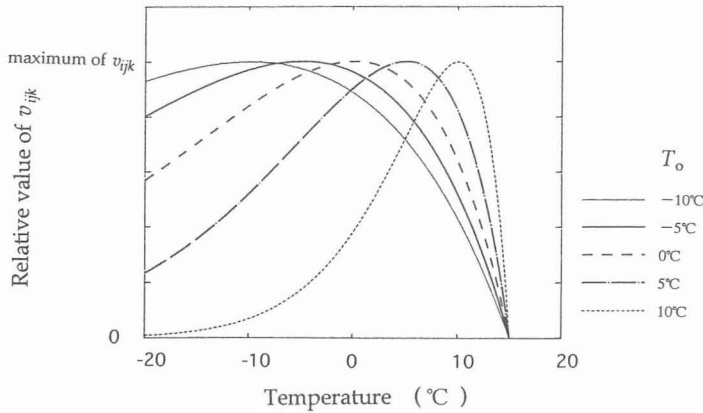


Fig. 2. Relative changes in the value of v_{ijk} , expressing the rate of rest break, as a function of chilling air temperature. Changes in v_{ijk} calculated using various T_o (optimum temperature for rest break) are shown.

はそれぞれの T_o で最大値となる。また、本研究では上限温度 T_u 以上の温度では v_{ijk} を 0 で一定と考える。

ところで、自発休眠中には高温によって花芽の発達が進められると考えられることは少ない。しかし、前にも述べたように、花芽発達を抑制する自発休眠の影響が低温に遭遇することで次第に弱まり、それに伴って気温に対する花芽発達の応答が増加することで、自発休眠が終了するという考え方があられる (Felker and Robitaille; 1985)。花岡ら (1980) によれば、野梅性 (冬至) のウメの場合、開花促成の開始可能時期とされる 12 月上旬の時点には、休眠解除の進み具合の指標となる促成時の開花率の増加や到花日数の減少が既にかなり進み、これ以降も長く続いている。そこでここでは、休眠明け前後に残った花芽発達を抑制する休眠の影響が、低温を受けることにより次第に減少し、それに伴い花芽発達への気温の効果が増加すると仮定することにした。

本研究では、上に述べた v_{ijk} の積算値を、低温により休眠解除の進んだ量を表す指標として考える。低温により休眠解除が進むに従い、気温に対する花芽発達の応答が増加するという上記の仮定から、ある時点までの v_{ijk} の積算値を、低温要求量全体に対する 0~1 の範囲の相対値に換算し、これをその時点の花芽発達の気温に対する応答の度合を表す重みと考える。そして当該日の温度変換日数 $(t_s)_{ij}$ にこの重みを掛けた補正值 $(t_s)_{ij}^*$ を開花日の推定に用いた。

実際の計算手順は以下の通りである。まずある起算日 (D_0) から休眠による花芽発達への抑制の効果がなくなる平均日として想定した日 (D_T) までの期間中における v_{ijk} の平均積算値 (M_v) を以下のように求めた。

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=D_0}^{D_T} \sum_{k=1}^{24} v_{ijk} / N = M_v \quad (7)$$

この平均積算値 M_v が、想定された D_T に対応するウメの低温要求量の平均値を表すと考える。次に日ごとの v_{ijk} の積算値を低温要求量 M_v で割り、0~1 の範囲の指数 W_{ij} で表す。たとえば i 年 n 日の終わった時点については以下のように表す。

$$\sum_{j=D_0}^n \sum_{k=1}^{24} v_{ijk} / M_v = W_{in} \quad (8)$$

この W_{in} を、 i 年の通日 n 日が終わった時点における花芽発達の気温に対する応答の度合を表す相対的な指数 (重み) とする。この W_{in} が時間の経過とともに大きくなるにつれて、ウメの花芽発達に対する気温の影響も次第に大きく

評価される。ここでは i 年の通日 j 日における温度変換日数に、その前日 $j-1$ 日の時点の重み $W_{i(j-1)}$ を以下のように掛けて、休眠解除の程度を考慮した温度変換日数の補正值 $(t_s)_{ij}^*$ を求める。

$W_{i(j-1)} < 1$ の場合 (休眠の影響のある期間中)

$$(t_s)_{ij}^* = W_{i(j-1)} \cdot \exp \{ E_a (T_{ij} - T_s) / RT_{ij} T_s \}$$

$W_{i(j-1)} \geq 1$ の場合 (休眠の影響がなくなった後)

$$(t_s)_{ij}^* = (t_s)_{ij}$$

(9)

本研究では (9) 式の E_a に、2.2 節で述べた方法による各地の適切な値を用いた。その理由は、この適切な E_a 周辺の値で得られる種々の開花日の推定誤差は、互いに大きな差のないこと (小元・青野, 1989; 青野・小元, 1992)、また最も適切な E_a を用いても、そうでない近い値を用いても、休眠解除の遅速を考慮した場合に開花日の推定精度が向上することが、ソメイヨシノについては確かめられていること (青野・小元, 1990a) である。

この推定方法は通常温度変換日数法と異なり、休眠解除を考慮し始める日の翌日 ($D_0 + 1$) を起算日とするが、低温量が少なく W_{ij} が 0 に近い間は $(t_s)_{ij}^*$ はほとんど積算されない。しかしながら (9) 式は、休眠が解除され始めると同時に花芽が発達し始めることを表すことになるので、この部分は花芽の生理・生態の面から見ると無理がある。ただし、観賞用のウメについて、休眠のために抑制されながらも、どの時点から花芽発達が可能になるかは分かっていない。従って、本研究ではこの計算式を便宜的に用いることにした。またここでは低温量から換算した重みを、そのまま温度変換日数に掛けているが、これが最適な方法かについては今後の検討を要する。

この解析の結果では、 W_{ij} が1に達する日が D_T を中心に年ごとに変化することになる。計算上はその日を、年ごとの休眠の花芽発達に対する影響が完全になくなった日と考えることになる。上記以外は通常の温度変換日数法による推定方法と同じで、本研究の場合、15年間の $(t_s)_{ij}^*$ の平均積算値 \overline{DTS}^* を求め、もう一度 $D_0 + 1$ から $(t_s)_{ij}^*$ を積算し、 \overline{DTS}^* に達した日を推定開花日とした。

この推定方法で適切な値を設定すべきパラメータは、 W_{ij} の起算日 D_0 、休眠期間中の感温特性に対する最適温度 T_0 、そして M_v を求めるために仮に設定する休眠の影響のなくなる平均日 D_T である。本研究では D_0 を通日50~80日(10日間隔)に、 T_0 を-10~10℃(5℃間隔)に、また D_T を通常の温度変換日数法による各地の適切な起算日 D_s の前後60日間(1日間隔)に設け、全ての組合せについて推定誤差(RMSE)を求めた。その上で、RMSEが最も少なくなったときのパラメータを適切な設定値として用いることにした。

本研究では、通常の温度変換日数法による場合と推定精度を比較し、休眠期を考慮することにより推定精度の向上が見られたかを確かめる。またこれらの検討の前に、休眠を考慮する上で必要な上記のパラメータの適切な値の持つ、具体的な意味についても考察する。

3. 結果及び考察

3.1 推定に適切なパラメータの組合せ

3.1.1 通常の温度変換日数法の場合

Fig.3に起算日 D_s と温度特性値 E_a の組合せによるRMSEの変化の例をプロットの濃淡で示す。各地点とも誤差の小さな組合せの

領域がかなり明瞭に見られた。こうした組合せの中で最も少ない誤差をもたらした起算日 D_s と温度特性値 E_a の適切な値を、Table 1で地点別に示す。各地の起算日 D_s の適切な値は通日74~127日(11月13日~1月5日)の範囲となった。このうち、過半数の9地点では通日100~110日(ほぼ12月中旬に相当)の範囲におさまった。地域的な傾向は特に認められなかった。一方、適切な温度特性値 E_a は64~120 kJ mol⁻¹のかなり大きな範囲にわたった。 E_a についても地域的な特徴は見られなかった。これらの適切な値の組合せの地点別の違いは、気候条件

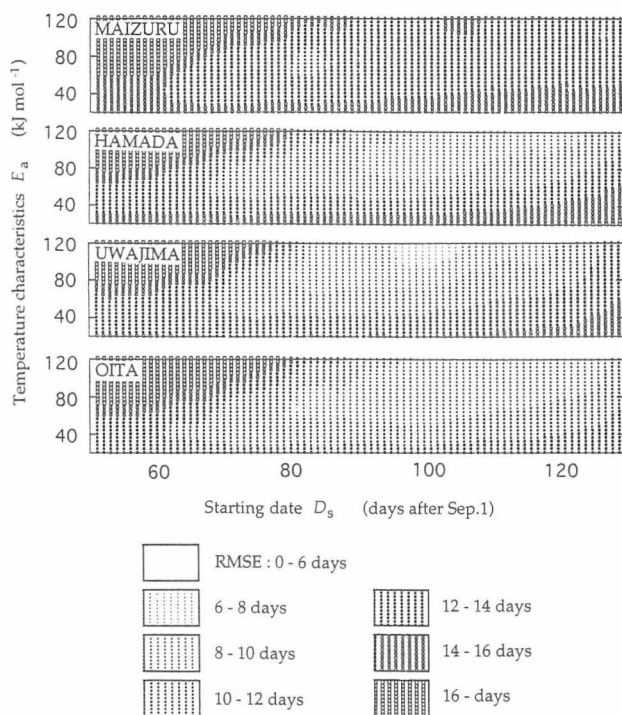


Fig. 3. Distribution of root mean square error for various combinations of starting date D_s and temperature characteristics E_a .

Table 1 The combination of starting date D_s and temperature characteristics E_a which gave most accurate estimation at each station. Averaged DTS accumulations \overline{DTS} is also shown.

Station	D_s^\dagger	E_a	\overline{DTS}	Station	D_s^\dagger	E_a	\overline{DTS}
		(kJ mol ⁻¹)	(days)			(kJ mol ⁻¹)	(days)
Hikone	127	120	5.67	Kochi	107	76	16.29
Maizuru	82	76	31.21	Fukuoka	96	116	18.39
Wakayama	104	88	21.42	Oita	100	92	18.29
Hiroshima	86	80	27.08	Nagasaki	104	88	17.36
Matsue	74	96	26.89	Saga	105	100	13.65
Hamada	102	104	16.74	Miyazaki	105	76	19.90
Takamatsu	85	64	29.17	Kagoshima	107	84	17.41
Uwajima	102	120	11.05				

†: indicated in days after Sep. 1.

によってシステマティックに現れたものというよりも、地点による品種間差によって生じた可能性が高い。ただし、全地点で全く同じ種を温度変換日数法により推定した場合でも適切な起算日と E_a との組合せが気候条件に関係なく大きく異なることもあり (小元・青野, 1989; 青野・小元, 1992), 今回の場合, どの程度, 地点ごとの品種間差が影響したかについては不明である。

3.1.2 休眠解除を考慮した温度変換日数の補正值による方法の場合

Table 2 に, 各地で最小の誤差の得られたパラメータ D_0 , T_0 , D_T の値の組合せを示す。また, Fig. 4 には, そのうち 4 地点について, 最も適切な D_0 を用いた場合における, 推定誤差 (RMSE) の D_T による変化を T_0 別

に示す。Table 2 によると, パラメータのうち D_0 の値は山陰や九州では通日 50 日 (10 月 20 日) の地点が多く, そのほかの地域では通日 60 日 (10 月 30 日) の地点が多かった。花岡ら (1980) は, 群馬県内各地のウメ (冬至) の花芽が, 県下全般に 10 月中・下旬頃に花芽形成が停止して休眠に入る直前の雌ざい形成の段階に至ることを示した。また, 五井 (1982) の香川県内における調査結果もほぼ同じであった。以上から西日本では全般的に, 10 月中・下旬頃にはウメの花芽が形態的に既に休眠期にあり, 低温に感応し得る状態になっている可能性が高い。従って, これらの起算日 D_0 の適切な値は, 実際の花芽の形態的な面から見て, 低温感応の始まりの時期として妥当と言える。

Fig. 4 に示した各地点の誤差の推移のうち, 最も RMSE が低くなった部分を持つ曲線の計算に用いた T_0

が, その適切な値にあたる。各地点の RMSE の推移を見ると, 全般的には T_0 が $-10 \sim 0$ °C (263~273 K) の 3 つの場合の間には, 誤差の最小値に差は余り見られなかった。この 3 つの T_0 の場合で最小の誤差が得られた地点は 15 地点中 10 地点で, 全体の 3 分の 2 を占めた。

ウメの休眠解除に対する適温について調べた研究例は極めて少ないが, 五井 (1982) は 0 °C 周辺の気温と推測している。0 °C 周辺の気温がウメの休眠解除の適温として一般にあてはまるとすると, 今回の様に T_0 が $-10 \sim 0$

Table 2 The combination of three parameters, D_0 , T_0 and D_T , which gave most accurate estimations with correction considering rest break process at each station.

Station	D_0		T_0	D_T		DTS^*
	A	B		A	B	
Hikone	60	Oct. 30	5	167	Feb. 14	8.41
Maizuru	60	Oct. 30	-10	69	Nov. 8	42.34
Wakayama	60	Oct. 30	-5	111	Dec. 20	27.98
Hiroshima	70	Nov. 9	-10	85	Nov. 24	31.45
Matsue	50	Oct. 20	-10	79	Nov. 18	31.85
Hamada	50	Oct. 20	-5	102	Dec. 11	27.47
Takamatsu	60	Oct. 30	10	87	Nov. 26	36.12
Uwajima	60	Oct. 30	10	108	Dec. 17	18.28
Kochi	50	Oct. 20	-5	107	Dec. 16	28.14
Fukuoka	50	Oct. 20	0	101	Dec. 10	25.55
Oita	50	Oct. 20	-5	99	Dec. 8	28.83
Nagasaki	50	Oct. 20	0	100	Dec. 9	29.75
Saga	50	Oct. 20	5	103	Dec. 12	24.65
Miyazaki	60	Oct. 30	-10	111	Dec. 20	27.97
Kagoshima	80	Nov. 19	-10	112	Dec. 21	22.50

A: indicated in days after Sep. 1.
B: indicated in calendar date.

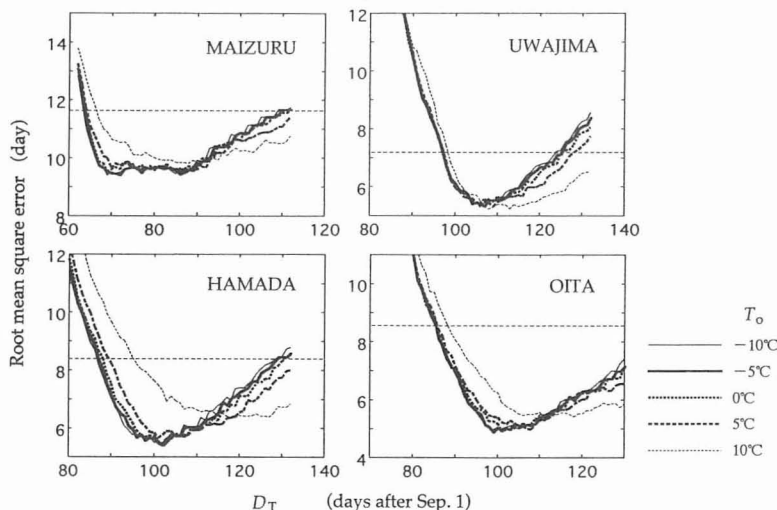


Fig. 4. Changes in root mean square errors as a function of the date D_T , assumed as the average date on which the yearly rest break completes.

℃の範囲でRMSEの変化に余り差が見られなくなることも十分にあり得る。それは西日本では厳冬期でも実際に0℃以下の温度にさらされる時間が少ないことによる。今回の方法で T_0 を0℃以下のいずれの温度に設定しても、西日本の冬の寒さ程度では、低い温度ほど、計算上大きな値の W_{ij} が積算されることになる。

本研究ではこの後、誤差が最小になったTable 2のパラメータの組合せをそのまま開花日の推定に用いる。しかしながら、Fig. 4で見られるような、誤差の最小値が $T_0 = -10 \sim 0$ ℃でほとんど差のない多くの地点では、上に述べた理由から、 T_0 を0℃周辺の値と考えた方が実際の花芽の感温特性にあっていいる可能性が高い。

一方、残る5地点のうち3地点では T_0 の適切な値が5℃の場合に適切なパラメータの組合せが得られた。5℃周辺の気温はモモ、リンゴをはじめとする多くの落葉果樹の休眠解除への適温とされる(Richardson *et al.*, 1974; Shaltout and Unrath, 1983)。これらの地点の品種は、他の多くの落葉果樹の場合と同様な休眠時の感温特性を示している可能性もある。

計算の上で花芽発達に対する休眠の影響の終わりの平均を想定した日 D_T の適切な値は、Fig. 4に示した誤差の推移のうち、適切な T_0 による曲線上で最もRMSEが小さくなった部分にあたる。Table 2によれば、 D_T の適切な値は一部の地点を除いて通日80~110日(11月下旬~12月中旬)の範囲となった。舞鶴では T_0 が-10℃の場合に D_T が通日69日で適切と判断され、この範囲から外れる。しかし、 T_0 を先に述べたことに基づき仮に0℃とした場合、 D_T が通日86日のときに誤差は最小となる。彦根では適切な D_T が連日167日と他に比べて非常に遅いが、その理由は不明である。

五井(1982)は、香川県下で12月上旬以後に促成を開始できることを示しており、西日本のウメについては全般的にこの時期に休眠がかなり解除されているものと見られる。これら既往の知見と比較すると、各地の適切な D_T は休眠がもたらす花芽発達への抑制が終わる平均的な時期を反映したものであると思われる。

3.2 推定結果

通常の温度変換日数法と、休眠を考慮した補正値を用いた方法による、開花日の推定結果の例をFig. 5に示す。各地点における通常の温度変換日数法による場合、全般的な開花日の変動は捉えられているものの、- (早くなる) 方向の誤差がとりわけ1978や91年に、また+(遅くなる) 方向への誤差が1982や87

年に大きくなる傾向が全地点を通して見られた。こうした場合の気温の推移に注目すると、たとえば大分では-の誤差が顕著な1978年の前年の10, 11月の平均気温が平年に比べ1.1℃, 1.6℃それぞれ高く、+の誤差が顕著な1982年についてのそれは0.6℃, 1.3℃逆に低くなっていた。このように誤差が顕著な-の値となったほとんどの場合には、開花前年の10, 11月の少なくともいずれかの平均気温が平年に比べて1℃以上高く、また+の場合には逆に1℃以上低い。このうち前者の場合は、休眠解除が例年より遅れ、後者の場合は逆に早く進捗したと考えられる。通常の温度変換日数法の場合、地点ごとの適切な起算日の値は、それ以降、開花までの温度変換日数の積算値の年ごとの変動が最も少なくなることから決められるものである。しかし、ウメの場合には適切な D_0 の時点であっても、開花前年の秋~冬季の気温の影響から休眠解除の進捗に大きな年次間差が生じ、起算日から開花までに必要な積算値にも顕著な差が現れ、結局大きな誤差を生んだと思われる。

一方、休眠解除を考慮した補正値を用いた場合、特に前述の休眠解除が平均より遅れたと思われる年(1978, 91年)や早まったと思われる年(1982, 87年)に、通常の温度変換日数法による場合と比べて、推定開花日が実際の開花日に近くなる傾向が見られた。休眠解除が遅れたと思われる前述の大分の1978年の場合、補正前の推

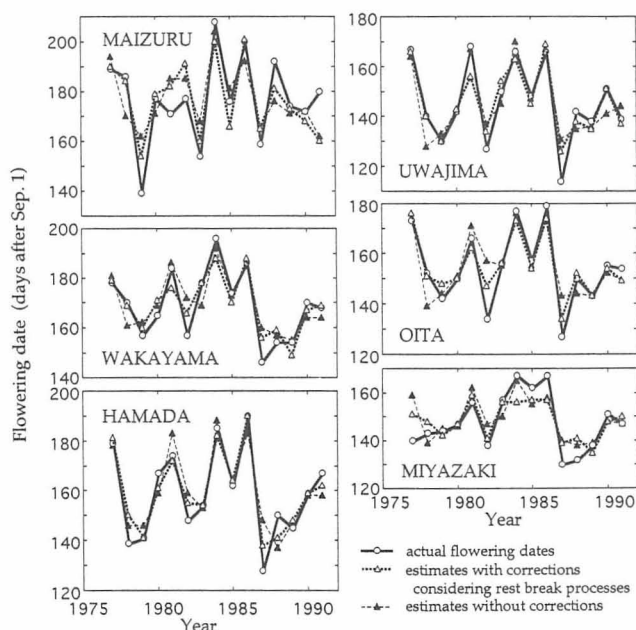


Fig. 5. Yearly variation of actual and estimated flowering date of *Prunus mume*. Both estimated value with and without correction considering rest break processes are shown.

定開花日の誤差は-13日であった。補正値を用いた場合、この年の W_{ij} が1となる日は通日100日で、 D_T に比べ9日遅く評価された。こうしてこの年の休眠の遅れを考慮した結果、 $(t_s)_{ij}^*$ の増加が緩やかになり、開花日の推定誤差は-1日へと大幅に減少した。これとは逆に休眠解除が早く進んだと見られる1982年は補正前には+23日の誤差があった。補正値を用いた場合には、この年の休眠明けが平均より7日程度早く評価され、その分 $(t_s)_{ij}^*$ の積算値の増え方も急になったことから、結局、推定誤差は10日減少した。

以上のような休眠解除の遅速による補正前の大きな誤差の現れたケースは、この他にも数多く見られた。補正値を用いることにより、これらのうち半分以上のケースについては上記の大分の例と同様に誤差を減少させることができた。中には、休眠解除を考慮することによって、誤差が-17日から0日になった場合(松江の1978年)も見られた。

しかしながら、たとえば12月の平均気温が8℃以上とかなり高い九州南部の宮崎と鹿児島の場合、実際の開花日の変動が他地点に比べ小さいにもかかわらず、補正値を用いたことで、却って開花日の変化を捉えられなくなる年が多くなった(特定の年の顕著な誤差の減少によりRMSE自体は少なくなった)。これらの地点では、休眠中のウメの感温特性をうまく考慮できなかった可能性がある。これまでに、同じ種または品種であっても、暖地であるほど花芽・葉芽の休眠明けのための低温要求量が少なくなる現象が知られている(Perry and Wu, 1960; Balandier *et al.*, 1993)。一方、暖地で栽培されているクワの品種ほど、休眠明けのための低温要求量が少ないことも報告されている(八尋・福永, 1983)。宮崎や鹿児島のウメの場合、気候差もしくは品種間差に起因する低温要求量の減少が生じていることも考えられる。九州南部以南の暖地のウメについては、他地域よりも低温要求量が少ないかどうか、あるいはそうした場合に休眠期から花芽発達期への感温特性の変化をどの様に考慮すべきかについて、さらに検討する必要がある。

3.3 推定精度

各地点における補正前・後における推定開花日のRMSEをTable3に示す。補正前のRMSEは全般的に7~12日の範囲であったが、補正後には5~10日の範囲まで減少した。誤差の減少は全地点で見られた。うち補正による最大の誤差の減少は高知(3.89日)、最小は福岡(0.30日)で現れ、過半数の地点ではRMSEで2日以上誤差の減少が確かめられた。

ところで、今回用いたウメの実際の開花日の標準偏差は小さな地点で10日程度、大きな地点では20日以上と、

Table 3 Root mean square error (RMSE) shown in the estimation with (A) and without (B) correction considering rest break process. Estimation for each station was made by use of most suitable combination of parameters shown in Tables 1 and 2.

Station	RMSE		Station	RMSE	
	A	B		A	B
	(days)	(days)		(days)	(days)
Hikone	8.56	9.58	Kochi	6.40	10.30
Maizuru	9.40	11.64	Fukuoka	10.03	10.33
Wakayama	5.39	6.91	Oita	4.90	8.55
Hiroshima	9.25	10.27	Nagasaki	5.32	8.22
Matsue	9.30	11.48	Saga	5.56	8.60
Hamada	5.43	8.40	Miyazaki	6.35	7.42
Takamatsu	6.01	8.55	Kagoshima	5.72	7.39
Uwajima	5.24	7.18			

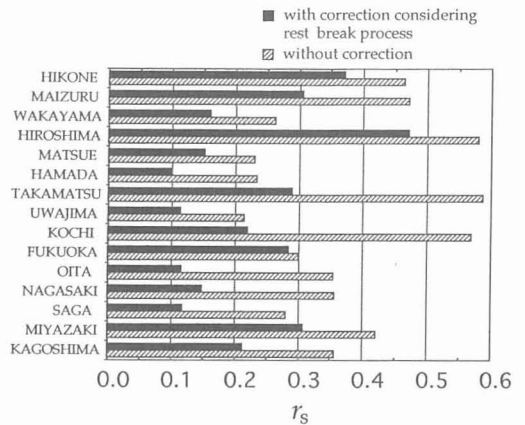


Fig. 6. Value of r_s , the ratio of variance of error for estimation of flowering date to variance of actual flowering date of *P. mume* at each station.

地点によって変動の大きさがかなり異なる。これは地点による品種の差や気候差によるものと考えられるが、こうした場合にはRMSEを使って地点間の推定精度を単純に比較できない。そこで、実際の開花日の分散に占める開花日の推定誤差の分散の比(以下 r_s と記す)を計算し、各地の実際の変動の大きさを基準として推定精度を検討した。その結果をFig.6に示す。各地の r_s の値は補正前には0.2~0.6と全般にかなり大きかった。一方、補正後には15地点中13地点で r_s が0.3前後かそれ以下の範囲まで減少し、開花日の分散を基準にした推定精度はかなり向上していることが分かった。補正後の r_s が最も小さくなったのは浜田(0.098)で、それに宇和島(0.114)、佐賀(0.118)が続く。これとは対照的に広島では特定の年の顕著な誤差が減少せず、 r_s が0.471と最も大きくなっていた。

ソメイヨシノの場合、通常の温度変換日数法による開花日の推定値の r_s は全国平均で 0.24 である(青野・小元, 1992)。これに比べると、ウメの場合も今回対象とした地点のうち約半分については、休眠解除を考慮した方法によって、推定精度をソメイヨシノの場合と遜色のない程度まで改善できることが分かった。

この r_s を 1 から差し引いた値が、開花日の分散に対する推定方法の寄与率に相当する。これによると休眠解除を考慮した補正後の方法は、15 地点中 13 地点で概ね 70~90% の開花日の分散に寄与したことになる。

本研究の解析結果では、地点によって補正の効果が余りなく、大きな誤差が依然残ったところがある。この原因は判然としないが、今のところ、i) 休眠期~花芽発達期の期間の感温特性を今回の方法で十分表現しきれなかった地点(あるいは品種)がある、ii) 気温以外の条件の年次間差が開花期の変動に寄与している、の 2 点が考えられる。特に i) については、前項で述べた低温要求量の少ないと見られる地点に関する問題以外にも、休眠中の落葉果樹が高温に遭うことでそれまで受けた低温の効果が「無効」になる現象 (Shaltout and Unrath, 1983; Erez *et al.*, 1979) をどのように考慮すべきか、あるいは同じく休眠中の花芽に、0℃以下の気温がどのような影響をもたらすかを、詳細に検討することが課題として残っている。

4. ま と め

本研究では西日本を対象に、野梅性のウメの花芽の自発休眠期~花芽発達期の緩慢な感温特性の変化を捉えることができ、なおかつ精度の高い開花日の推定方法の開発を試みた。開花日の推定は温度変換日数法を基本としているが、休眠を考慮するために、秋季以降の低温による休眠解除の日ごとの進み具合を気温の時間別データから推定し、それを 0~1 の範囲の相対値(重み)で表し、さらにこれを毎日の温度変換日数に掛ける、といった補正を行った。

休眠解除を考慮した推定に使用するパラメータの適切な値から見て、各地の休眠解除に向けての低温感応の始まりは全般的に 10 月下旬、休眠解除への適温は 0~5℃、休眠の花芽発達への影響のなくなる平均日は 11 月下~12 月中旬と推定される。

各地の誤差は、通常の温度変換日数法で RMSE が 7~12 日あったが、休眠を考慮した補正後には 5~10 日へ減少した。開花日の変動に対する補正後の方法の寄与率は、一部を除いて 70~90% となった。ただし、九州南部以南では補正により却って誤差が増加した年も多く見られた。今回の解析については、休眠中の感温特性のさ

らなる適切な表現方法など、検討すべき課題も残った。

引用文献

- 青野靖之・小元敬男, 1990 a: 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, 1990 b: 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.
- 青野靖之・小元敬男, 1992: ヤマトツジ・フジ・アザサイの開花日の推定. 農業気象, **47**, 233-240.
- Balandier, P., Bonhomme, M., Regeau, 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.
- 江幡守衛・石川雅士, 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について—. 農気東海誌, **45**, 27-29.
- Eggert, F. P., 1951: A study of rest in several varieties of apple and in other fruit species grown in New York state. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **51**, 169-178.
- 江口庸雄, 1931: 果樹の花芽分化期と開花期との関係に就て. 園学雑, **2**, 26-39.
- Erez, A., Couvillon, G. A. and Hendershott, C. H., 1979: Quantitative chilling enhancement and negation in peach buds by high temperatures in a daily cycle. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **104**, 536-540.
- Felker, F. C. and Robitaille, H. A., 1985: Chilling accumulation and rest of sour cherry flower buds. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **110**, 227-232.
- 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. 香川大農紀要, **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. 群馬園試報告, **8**, 1-18.
- 伊藤大雄, 1991: 休眠覚醒を考慮した桑萌芽過程の反応速度論的モデル. 日作紀, **60**, 47-56.
- 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.
- 小池 清, 1941: 岐阜県に於ける白梅開花に就いて. 天気と気候, **8**, 87-89.
- 高馬 進, 1953: 落葉果樹の自発休眠に関する研究 (I) 自発休眠期の開始, 完了並びに自発休眠の深さについて. 信州大農紀要, **3**, 189-204.
- 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.
- 中川行夫・金戸橋夫・角田篤義, 1966: 果樹の気象的適

- 地に関する研究(4)ウメの開花結実と冬の気温. 農業気象, **21**, 131-136.
- 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.
- 小野祐幸・金野隆光・田村良文, 1987: 永年作物の感温特性に関する研究(第1報)果樹の開花における感温特性. 園学要旨昭 62 秋, 72-73.
- 小野祐幸・金野隆光・田村良文・鴨田福也・杉浦俊彦・奥野 隆・浅野聖子, 1988 a: 永年作物の感温特性に関する研究(第2報)ナシの開花期予測. 園学要旨昭 63 春, 142-143.
- 小野祐幸・金野隆光・田村良文・岩垣 功・高原利雄・山田彬雄, 1988 b: 永年作物の感温特性に関する研究(第3報)カンキツの開花期予測, 園学要旨昭 63 春, 30-31.
- 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.
- Perry, T. O. and Wu, W. C., 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. *Hortsci.*, **9**, 331-332.
- Shaltout, A. D. and Unrath, C. R., 1983: Rest completion prediction model for 'Starkrimson Delicious' apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **108**, 957-961.
- Shigehara, K., Okamura, T., Nakayama, N. and Watanabe, F., 1991: Phenological observation data in Japan to be utilized as an indicator of climatic variation. *Proc. International Conference on Climatic Impacts on the Environment and Society*, C1-6.
- 塚本洋太郎(総監修), 1988: 園芸植物大事典 I. 小学館, 東京, p. 289-294.
- 渡辺 進・川口松男・村岡邦三, 1975: ウメの生産安定技術の確立 II 気象とウメの開花・結実について. 群馬園試報告, **4**, 45-61.
- Weinberger, J. H., 1950: Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **56**, 122-128.
- 八尋正樹・福永雄二, 1983: 亜熱帯(南西諸島)におけるクワ冬芽の休眠打破に要する低温時数. 熱帯農業, **27**, 92-97.
- 山田彬雄・小野祐幸・金野隆光・上野 勇, 1988: カンキツ類の開花における感温特性の品種間差異について. 園学要旨昭和 63 秋, 60-61.