

速度論的手法によるソメイヨシノの開花日の推定

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者	小元, 敬男 青野, 靖之
巻/号	45巻1号
掲載ページ	p. 25-31
発行年月	1989年6月

速度論的手法によるソメイヨシノの開花日の推定

小元 敬男・青野 靖之

(大阪府立大学農学部)

Estimation of Blooming Date for *Prunus yedoensis*
by Means of Kinetic Method

Yukio OMOTO and Yasuyuki AONO

(Lab. of Agrometeorological Environment,
College of Agriculture, University of Osaka Prefecture,
Sakai 591, Japan)

An attempt is made to estimate blooming dates of *Prunus yedoensis* for 21 meteorological stations in Japan by using DTS (the number of days transformed to standard temperature). The starting date for computation at each station is determined by correlation analysis. At many stations the date lies between 40 and 55th day from January 1st.

The number of days transformed to a standard temperature (in this study 25°C is used) at each station is computed by adding characteristic temperature of each day from a starting date to blooming date for various temperature characteristic (E_a). The estimated blooming date is the date when accumulated value of DTS reached at that of mean observed blooming date for the site.

It is found that 17 kcal mol⁻¹ for E_a gives minimum error when averaged over all sites. Using this E_a and D_2 which is the starting date determined from error analysis, computations are made to estimate blooming dates at each station between 1961 and 1985. It is shown that at stations in Hokkaido and Tohoku districts, RMS errors between the observed and the calculated blooming dates fall between 1 and 2 days. At stations in other areas, the errors range between 2 and 3, except for Hachijo where it becomes 6.7 days. The large error at this southernmost station seemed to be attributed to year to year change of degrees of rest completion of *Prunus yedoensis*, which affect effectiveness of temperature just before blooming.

Key words: Blooming date, Cherry flower, DTS (number of days transformed to a standard temperature), Kinetic method, *Prunus yedoensis*.

キーワード: 温度変換日数, 開花日, サクラ, 速度論的手法, ソメイヨシノ

1. ま え が き

気温の推移がソメイヨシノの開花日の変動に決定的な影響を与えることから、両者の関係について沢山の調査・研究がなされている。それらは次のように分類することができます。

i) 単純に、開花前 X 日(月)間の平均気温と開花の遅速を関係づけようとするアプローチ。これらは更に、単純平均を用いる場合(伏木測候所, 1953)、開花日に近い期間に重みを付ける方式(篠崎・安西, 1954)、あるいは、

開花日前数日を計算から除外する(篠原, 1952, 1953)などの試みが含まれる。ii) 計算期間を違えると日平均気温だけでなく日最高気温を用いるなど複数の変数を用いた重相関式による予測(坂井・河原, 1953; 熊野, 1957)。iii) 気温(T)がある臨界値(α)以下では開花生理に全く影響を及ぼさないとして、 $T_i - \alpha \leq 0$ (ここで T_i は日平均気温、または月平均気温)の場合はそれを全て0として計算する有効積算気温を用いる方法(江幡・石川, 1987)。iv) その他、積算気温の地理起源による違いを Linsser の法則を用いて補正しながら推定を試みる(Reader, 1983)、最高、最低気温から推定したデイグリーアワー(Lindsey and Newman, 1956)や実際

の経時データから計算したディグリーアワーを使用する (Lindsey, 1963) といった方法である。

最近、金野・杉原(1986)は、Arrheniusの法則を用いて生物活性への温度の影響を評価する指標として温度変換日数(DTS)という指数を提案した。これは、ある温度下にある日数おかれた条件は、標準温度に変換すると、何日に相当するかを表わすものである。金野らは、さらに、温度変換日数を植物生態気候区分への応用を試み、年間25℃を標準温度とする温度変換日数が温量指数とよく対応することを見出している。このことは、温度変換日数を、有効積算気温を用いることのできる生物現象の予測に適用できることを示唆するものである。また小野(1987)は、サクラを含む各種の果樹、花木の開花日の解析にこれを適用し、かなり高い精度で推定できることを示した。本論文には、ソメイヨシノの開花日の変動のより細かい分析にこの方法を適用した結果を示す。

ところで、気温を用いたこれまでの開花予測式の大きな欠点として、予測式が各地点毎に独立に作られるために、幾つもある予測式間の相連を地域差の解明に利用できないことが挙げられる。このため、開花予測式を気候学的あるいは植物生理学的な研究に用いることができない。しかし温度変換日数を用いることによって、気温と開花のデータさえ揃っていれば全国どの地点についても同じ形式による開花日を予測でき、例えば、予測日と実際の開花日との差についても、意味のある分析が可能となる。

本論文では、比較的長期間にわたって開花日の資料の揃っている全国21気象官署について温度変換日数を用いて求めた開花日の変動と実際の比較を試み、実際と推定値の差にみられる地域的な特徴を議論する。

2. データおよび解析方法

解析対象として選んだ21地点はFig.1に示す通りである。データとしては、気象官署発表の開花日と、各気象官署の日平均気温を用いた。解析期間は1961~1985年の25年間である。

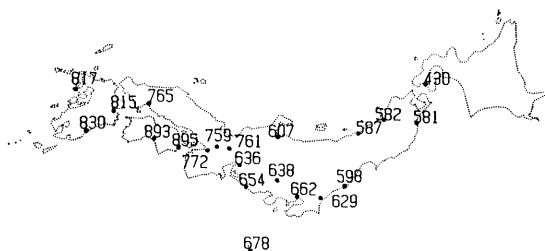


Fig. 1. Map showing the meteorological stations used in this study

2.1 開花に気温が影響する時期

最初に、ソメイヨシノの開花にいつ頃からの気温が影響するかを、気温と開花日の単相関により判定した。まず、各地点の毎年開花日までのいろいろな日数の平均気温を計算し、この平均気温と開花日の相関係数を求めた。気温を平均する日数は1日ずつ増加させ、各場合で解析を行った。そして気温を開花まで何日間平均すれば開花日との相関が高くなるかを判定した。そして、この日数の期間の始まりが通日で平均していつになるかを、各地点の平均開花日から計算し、これ以後の気温が開花に大きく影響すると見なしこの日を起算日 D_1 とした。

2.2 温度変換日数による推定

温度変換日数は、反応速度論的な考え方に基づき、温度による、生物活性の変化を説明することを目的としている。従来から反応速度論を生物活性の温度による変化に取り入れてきたものとしては、土壌中の有機態窒素の無機化(たとえばStanford and Smith, 1972; Tabatabai and Al-Khafaji, 1980; Addiscott, 1983)や、有機物の分解(たとえばHarper and Lynch, 1981)など、土壌中の微生物が関係した現象の解析が多いが、金野(1976)のように、各種作物の種子の発芽速度の解析に適用した例も見られる。金野・杉原(1986)は、比較的簡単な速度論的概念に基づき、ある温度条件下での1日分の反応量が、特定の標準温度の下では何日分に相当するかを換算する温度変換日数を提案し、それを土壌の有機物分解の解析に用いた。この温度変換日数は以下の2つの仮定により成り立っている。

まず、反応速度定数 k の温度による変化が、Arrheniusの式に従うとすることである。一般に、化学反応が生じている場の温度が高いほど、 k も大きくなる。Arrheniusの式は反応条件の絶対温度(T)と温度特性値(E_a)を使って、 k の温度による変化を次のように表わすものである。

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (1)$$

ここで A は頻度因子(ここでは温度条件が狭い範囲なので定数とする)、 R はモル気体定数(1.987 cal deg⁻¹ mol⁻¹)である。

もう1つの仮定は、ある特定の反応量に達するのに要した期間 t とそのときの k との積は、異なった温度の条件でも一定になるというもので、

$$tk = t'k' = t''k'' = \dots = (\text{一定}) \quad (2)$$

と表わせる。ここでは、同一の温度での k は経時的に変化しない、つまり、反応に使われる物質の濃度により k が変化を受けない零次反応の概念に似た状況であることを前提していると解釈できる。

この(1)式と(2)式より、ある i 日での温度条件(T_i)

での1日分の反応量が、特定の標準温度 (T_0) の条件での何日分 (t_0) の反応量に相当するかを、以下のように表わすことができる。

$$t_0 = \exp \{ E_a (T_i - T_0) / RT_i T_0 \} \quad (3)$$

これが、金野らの提案した温度変換日数の式である。ここでは、反応温度 T_i に日平均気温を用い、また T_0 を金野らが行ったように 298°K (25°C) とした。Fig. 2 は異なる E_a を使って計算した温度変換日数の反応温度による推移である。反応温度が 25°C のときは、温度変換日数は1日であり、温度が低くなるにつれてどの E_a でも温度変換日数は減少する。また、 E_a が大きいほど温度変換日数の温度による変化も顕著となる。

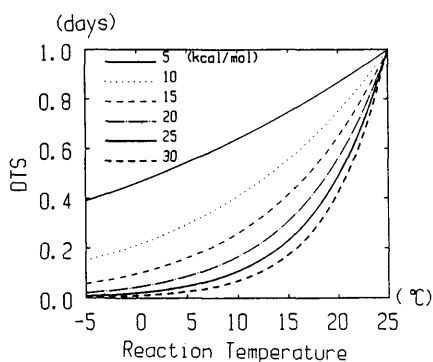


Fig. 2. Relationship between DTS calculated for various E_a and reaction temperature

本研究では、 E_a を 5~30 kcal mol⁻¹ (1 kcal mol⁻¹ 間隔)、起算日を通日1日~平均開花日のおよそ15日前(1日間隔)の組み合わせそれぞれについて、開花日の推定を試みた。まず各起算日から、(3)式の日別の温度変換日数を求める。そしてこれを起算日 (D) からある j 年の開花日 (BD_j) までについて積算し、1961~85年の平均の積算値 (DTS_{25}) を以下のように求める。

$$DTS_{25} = \left(\sum_{j=1}^{25} \left(\sum_{i=D}^{BD_j} \exp \{ E_a (T_i - T_0) / RT_i T_0 \} \right) \right) / 25 \quad (4)$$

この平均積算値に達している日を毎年について見出し、この日を開花推定日とした。推定精度は、平均二乗誤差ならびにRMSとして表わした。それは、先に筆者ら(青野・小元; 1987)が用いた‘誤差の標準偏差’に較べ、推定日と観測日の誤差が0から離れた場合での精度の検出に、より適当であると判断したためである。こうして求めた誤差から、どの起算日と E_a で一般的に精度よく開花日を推定できるかを検討した。また、ここで適当と判断した起算日は前に述べた起算日 D_1 とどのような関係にあるのか、あるいは、地点や年によりなぜ推定精度

が悪くなる場合があるのかなどについても考察した。

3. 結果および考察

3.1 起算日 D_1 について

Fig. 3 は富山と京都における平均気温と開花日との相関係数が、開花日を終点としての気温の平均期間によりどのように変化するかを示している。この例のように、平均する日数が40~60日するとき(酒田を除く)、負の相関が最も高くなる部分のはっきりと現われる場合、その日を第1起算日 D_1 とした (Table 1)。しかし、函館、秋田などの寒冷地や八丈島では、負の相関が最高になる日数のはっきりと現われなかったため、起算日 D_1 を判定できなかった。起算日 D_1 は酒田で通日27日、大分、宮崎でそれぞれ62日、67日となった他は、40~55日の範囲となった。つまり、上記3地点以外では2月中~下旬以降に、開花日までの平均気温が開花に最も影響することになる。江幡・石川(1987)は、名古屋での有効積算気温の起算日には2月11日(通日42日)が適当とした。また、篠原(1952, 1953)は、日本や朝鮮では通日40~55日以後に、気温が開花に影響し始める地点が多いと述べている。したがって、起算日 D_1 は、気温の影響が始まる時期としては、これまでの研究結果とあまり違いがない。

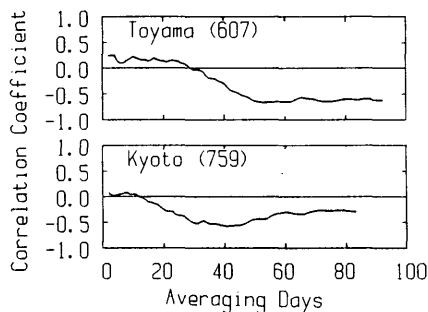


Fig. 3. Examples of the correlation coefficient between blooming date in each year and temperature averaged over the days before blooming

3.2 温度変換日数による開花日推定結果

Fig. 4 は 21 地点のうち、酒田から長崎までの 5 地点について、どの起算日と E_a の組み合わせで推定時の平均二乗誤差 (MSE) が小さいかを表わしたものである。淡く見えるほど誤差の小さいことを示している。全地点についてみると、概して暖地よりも寒冷地の方が推定誤差は小さくなった。また、推定誤差の小さい範囲は、図のように各地点とも明瞭に現われた。酒田では、広い範囲に平均二乗誤差 2 (日)² 未満の部分が現われており、

Table 1 Starting date D_1 determined by means of correlation analysis and D_2 decided as the day giving minimum mean RMS over 5–30 kcal mol⁻¹ of E_a for the selected 21 stations. RMS using D_2 and 17 kcal mol⁻¹ is also given.

Site No.	Site name	Starting date		Mean RMS	RMS using D_2 and 17 kcal mol ⁻¹ of E_a
		(D_1)	(D_2)		
		days after Jan.1	days after Jan.1	days	days
430	Hakodate*		13	1.869	1.562
581	Hachinohe*		16	2.149	1.510
582	Akita*		3	1.497	1.265
587	Sakata	27	30	1.518	1.184
598	Onahama*		45	2.450	1.833
607	Toyama	48	45	2.044	1.697
629	Mito	50	43	2.050	1.470
636	Nagoya	48	45	2.178	1.918
638	Kofu	48	44	1.939	1.497
654	Hamamatsu	49	45	2.664	2.200
662	Tokyo	44	46	2.826	2.522
678	Hachijo I.*		59	6.718	6.639
759	Kyoto	53	51	2.430	2.163
761	Hikone	47	43	2.034	1.833
765	Hiroshima	49	51	2.382	2.236
772	Osaka	50	50	2.450	2.209
815	Oita	62	63	2.620	2.538
817	Nagasaki	50	45	3.425	3.033
830	Miyazaki	67	64	2.507	2.383
893	Kochi	49	49	2.743	2.561
895	Tokushima	42	49	2.772	2.668

* Sites where the best negative correlation maximum is unable to be defined clearly.

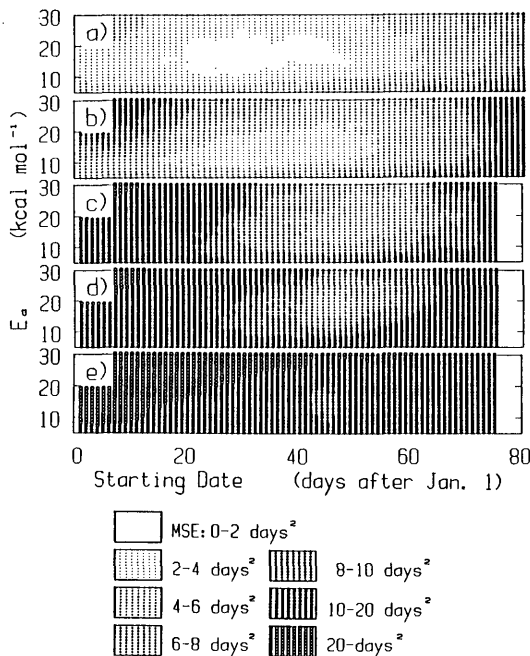


Fig. 4. Distribution of mean square error for various combinations of starting date and E_a ; a) Sakata, b) Toyama, c) Kyoto, d) Hamamatsu, e) Nagasaki

5地点の中で全体的に最も誤差が小さかった。しかし、富山、京都と暖かい地点となるにつれ、色の淡い範囲が少なくなり、長崎では、平均二乗誤差が最も小さい領域は8(日)²~10(日)²で、しかもその範囲はごく小さく、全体的に精度は悪い。ともあれ、誤差の小さい範囲は暖地よりも寒冷地の方がはっきりと、しかも大きく現われ、推定精度は良い。

各地の適当な起算日がいつかを見るために、 E_a が5~30 kcal mol⁻¹の範囲について、それぞれのRMS(MSEの平方根)の平均が最小となった起算日を求めた。平均のRMSを最小値とした起算日を D_2 とすると(Table 1)、秋田の通日3日から宮崎の64日まで、比較的広い範囲にちらばる結果となった。なお D_2 の値は、暖地より寒冷地で早い傾向があった。この方法での平均のRMSを最小にした起算日(D_2)と前に述べた起算日 D_1 との比較を行った(Fig. 5)。これによると、起算日 D_1 の方が、起算日 D_2 よりもやや早い地点が多いものの、2つの起算日はよく対応していることがわかる。このことは、開花に気温が最も影響する期間について、起算日 D_2 を使い温度変換日数を積算することにより、全般的により精度で開花日を推定できることを示唆している。

各地点とも同じ生物季節現象を対象としたために、こ

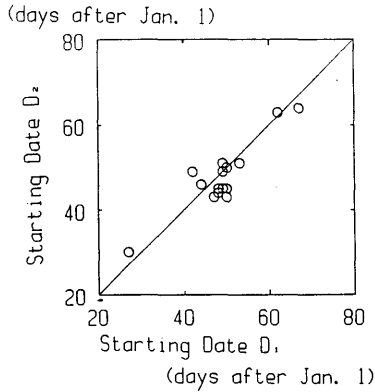


Fig. 5. Relationship between starting date D_1 and D_2 .

ここでは生物活性にかかわる E_a はどこでも一定と考える。その方が開花日に対する気温の影響を、全国規模で全般的に評価し易くなる。ところで、各地の E_a について、5から30 kcal mol⁻¹まで1 kcal mol⁻¹きざみに計算した RMS の平均値を最小とした起算日 (D_2) について見ると、推定誤差を最小にした E_a は、大阪の24 kcal mol⁻¹から八丈島の10 kcal mol⁻¹までの広い範囲にちらばっている。また、起算日 D_1 について RMS を最小とする E_a を比較しても地点によりかなりの違いがあった。

全体的に見れば、どの E_a が推定に最適であろうか。地点毎に異なった E_a の値を用いるよりは、全地点に共通な値を用いる方が便利なので、各地点の起算日 D_2 について RMS の全地点の平均を求めたところ、 $E_a = 17$ kcal mol⁻¹の場合が2.23日と最も小さい (Fig. 6)。そこで、国内全地点に共通の値として17 kcal mol⁻¹を用いることとした。ちなみに、16地点の起算日 D_1 での RMS を E_a 別に平均しても $E_a = 17$ kcal mol⁻¹ の場合が最小に近い誤差を与えることから、たとえ回帰分析によ

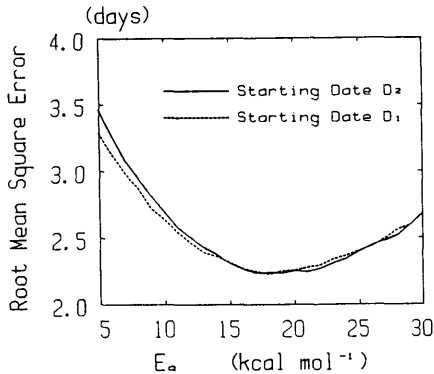


Fig. 6. Relationships between RMS averaged over 21 sites and E_a , for D_1 (dashed line) and for D_2 (solid line)

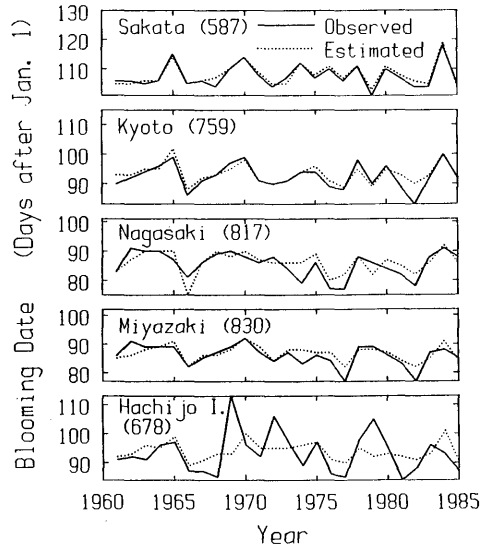


Fig. 7. Secular changes of observed (solid line) and estimated (dashed line) blooming date. Estimation was made by accumulated DTS with starting date D_2 and 17 kcal mol⁻¹ of E_a

り起算日を算出したとしても、 E_a としてこの値を使えば、比較的正確な推定が可能になると考えられる。

Fig. 7では起算日と E_a について、それぞれ起算日 D_2 と17 kcal mol⁻¹を用いたときの推定日と観測日を5地点について比較している。図中の酒田 (RMS=1.18日)に限らず、比較的寒冷な地方では推定日と観測日の変動がよく合っている。東北、北海道の各地や富山、水戸、名古屋などでは RMS が1~2日の範囲内におさまった。しかし京都のRMSは2.16日、宮崎は2.38日と温暖な地方になるほど推定誤差が増加した。西日本のその他の地点でも RMS は2~3日となった。とくに、長崎では RMS が3.03日と本土20地点の内では推定精度が最も悪かった。

暖地では、相対的に誤差が大きいが、これがとくにどのような年に顕著になるのかを調べてみた。Fig. 7に示した京都、長崎、宮崎の3例によると、1982年には推定日が実際より4~7日とかなり遅れている。また九州の両地点では、1974年、76年、77年の推定日も実際よりやや遅れている。同様な傾向は他の地点でも見られた。このような推定日の実際からの顕著な遅れは、各地の開花が極めて早い年に多く生じた。

暖地で見られるこの様な大きな推定誤差の原因は、休眠完了の度合によると思われる。冬季の自発休眠の完了が十分な程、開花までの有効積算気温や、落葉果樹の加温処理期間が少なくすむことなどが指摘されている

(江幡・石川, 1987; 小林, 1975)。したがって、開花に要する温度変換日数も同様に休眠完了の度合によって、年によりある程度変動し、開花までの積算値が平均値よりかなり異なれば、大きな誤差も生じうると思われる。たとえば京都では1982年の実際の開花が最も早かったが、推定日は7日も遅れた。この前年の11月の月平均気温は平年より1.8℃、12月は0.6℃低く、この後も平年より低いまま気温は推移したが、3月には急に気温が上昇し、平年に比べ1.0℃高くなった。この年の開花は比較的寒冷な冬によって、通常より休眠完了が十分となったために、開花に必要な温度変換日数が減り、加えて3月に入ってから急激に気温が上昇したため、開花が非常に早くなったと考えられる。推定日よりかなり早い開花は、どの地点でも開花前の11~1月のいずれかの月の平均気温が、平年より1℃以上低かったケースが多かった。したがって、他の地点の同じような誤差も、このようにして生じたものと思われる。

休眠完了が十分か不十分かが誤差に影響する顕著な例は、Fig.7の八丈島である。ここでは、RMSが6.64日と21地点中最大であり、特に1968年以降は、開花日の変動をほとんど捉えていない。冬季は他地点と比べて極めて温暖で(11月平均気温は平年で17.2℃、12月は13.0℃、1月は10.3℃)、休眠完了に必要な低温が十分でないこともしばしばあると考えられる。たとえば、1969年は4月23日と最も開花が遅れた。この前年の12月の平均気温が15.0℃と非常に高く、1月、2月も平年より1℃以上高いまま推移した。そして実際には休眠完了が不十分のまま、例年よりはるかに多くの温度変換日数を要したので推定日より20日も開花が遅れたものと思われる。したがって、暖地の開花日の推定には、休眠が十分か、あるいは休眠が早く終わっているかどうかを加味する必要があることを示唆している。

また、休眠が十分と思われる寒冷地でも、依然としてRMSで1~2日の誤差をとまなう。Boyer(1973)は、ダイオウショウの開花生理に対する気温の影響力が、時期により異なりうることを示唆した。また開花直前の著しい高温や低温により、開花予想にしばしば大きな誤差を生むことも知られており(市川, 1955)、開花直前には気温が開花に対して大きな影響を及ぼすと考えられる。気温の花芽への影響力が開花に近づくにつれ大きくなるという考えによると、気温の影響力を常に一定として積算した今回の推定方法は、必然的に精度に限界がある。開花日のより正確な推定のための次のステップは、積算前の休眠完了の度合や、時期による気温の影響力の違いなどを考慮に入れたモデルを作ることである。

4. 結 論

反応速度論に基づく温度変換日数を用いて、全国の21地点に関するソメイヨシノの開花日の推定を試みた。推定に適当とされた起算日は、東北、北海道地方の各地が通日20日以前、それ以外の暖地では通日40~55日の地点が多く、また各地のこの起算日は、平均気温が開花に影響しはじめる時期とほぼ一致することが判った。推定に適当な温度特性値 E_a の値は各地でかなりの差が見られたが、平均すると17~19 kcal mol⁻¹のあたりで最も精度よく開花日を推定する。

今回は E_a を17 kcal mol⁻¹とし、適当と思われる起算日から温度変換日数を積算、開花日を推定したところ、北海道や東北、北陸などの地点では、推定誤差がRMSで1~2日、またそれ以南では2~3日(八丈島では6.64日)となったが、極端な例である八丈島を含め、暖地での推定精度はかなり悪かった。その原因は、冬季の休眠完了が十分か不十分かによるものと思われるので、推定精度を上げるために、この点を考慮し、改良を試みている。

引用文献

- Addiscott, T. M., 1983: Kinetics and temperature relationship of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with differing histories. *J. of Soil Sci.*, **34**, 343-353.
- 青野靖之・小元敬男, 1987: サクラの開花データを用いたヒートアイランドの再現. 日本農業気象学会全国大会講演要旨, 18-19.
- Boyer, W. D., 1973: Air temperature, heatsum and pollen shedding phenology of longleaf pine. *Ecology*, **54**, 420-426.
- 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日について—. 農気東海誌, **45**, 27-29.
- 伏木測候所, 1953: 伏木における桜の開花期と気象の関係. 産気調報, **16**, 339-350.
- Harper, S. H. T. and Lynch, J. M., 1981: The kinetics of straw decomposition in relation to its potential to produce the phytotoxin acetic acid. *J. Soil Sci.*, **32**, 627-637.
- 市川寿一, 1955: 桜(そめいよしの)の開花に関する調査. 農業気象, **10**, 87-90.
- 小林 章, 1975: 生産適地果樹環境論. 養賢堂, 11-13.
- 金野隆光, 1976: 種子発芽速度と地温. 北海道農試研究資料, **8**, 43-58.
- 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. 農環研報, **1**, 51-58.
- 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. 産気調報, **20**, 75-78.
- Lindsey, A. A., 1963: Accuracy of duration temperature summing and its use for *Prunus serotula*. *Ecology*, **44**, 149-151.
- Lindsey, A. A. and Newman, J. E., 1956: Use of the official weather data in spring time-temperature analysis of an Indiana phenological record. *Ecology*, **37**, 812-823.
- 小野祐幸, 1987: 果樹の開花における感温特性評価, 地域農業資源の作物生態学的評価と利用. 第1回研究会資料, 76-89.
- Reader, R. J., 1983: Using heatsum models to account for geographic variation in the floral phenology of two ericaceous shrubs. *J. Biogeography*, **10**, 47-64.
- 坂井恭正・河原律子, 1953: 東京における桜(ソメイヨシノ)の開花予想. 産気調報, **16**, 65-69.
- 篠原久男, 1952: 気温がソメイヨシノの開花日に影響する時期. 農業気象, **7**, 18-20.
- 篠原久男, 1953: 朝鮮の桜開花日に影響する気温. 農業気象, **8**, 23-24.
- 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. 産気調報, **17**, 112-114.
- Stanford, G. and Smith, S. J., 1972: Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36**, 465-472.
- Tabatabai, M. A. and Al-Khafaji, A. A., 1980: Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 1000-1006.