



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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2009-08-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 青野, 靖之 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00009247

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

青野靖之

農学部・農業工学科・農業気象環境学研究室

(Received, 1992)

Climatological Studies on Blooming of Cherry Tree (*Prunus yedoensis*) by Means of DTS Method

Yasuyuki AONO

Laboratory of Agricultural and Environmental Meteorology, College of Agriculture

(Received, 1992)

Summary

Blooming dates of *Prunus yedoensis*, the most popular species in cherry trees of Japan, have been recorded at many meteorological observatories since the late 19th century. These records are useful for studies on evaluation of influence of climatic change to blooming at many places. Equations to estimate or predict blooming dates of *P. yedoensis* using temperature, were proposed by many workers. These equations gave accurate estimations and well expressed the relationship between both fluctuations in temperature and blooming dates. But, each of them were applicable only at or around the site for which equation was established.

The primary objective of this study is to develop the generalized method for estimation of blooming date for *P. yedoensis*, which is applicable at any site of Japan. In order to estimate blooming date, the accumulation model of index referred as DTS (the number of days transformed to standard temperature) is used in the present study. This DTS accumulation model, or DTS method, has been introduced recently for the purpose of prediction of blooming dates for some kinds of fruit species. In this study, a DTS accumulation model using air temperature data is developed applicable for many stations and to offer accurate estimation at each station. As the application of model, following are made: (1) A method to estimate blooming dates at places where phenological data are not available; (2) evaluation of the effect of urban warming to blooming dates; and (3) simulation of the impact of global warming on blooming date in Japan.

Main results obtained in this study are summarized as follows.

1. Characteristics of distribution and fluctuation of blooming dates of *P. yedoensis* were examined. It was qualitatively suggested that interannual and geographical variations of blooming date were attributed to the temperature during developmental stage of flower buds,

because the distribution and transition of springtime temperature considerably reflected in the distribution and density of isophen for blooming dates. Therefore, it was expected that blooming date of *P. yedoensis* might be well estimated by only taking account of temperature since rest break up to blooming. At warmer regions near the southern limit of range of *P. yedoensis* (i. e. Izu or Osumi Is.), however, it may be necessary to take account of interannual variation of transition of rest break, which makes blooming dates fluctuate largely.

2. The duration q , during which mean temperature affects the interannual variation of blooming date at each site, and its mean starting point D_r , were determined preliminarily by means of linear regression analysis. In the warmer regions than Tohoku district, the temperature averaged over 35–50 days up to blooming date showed the highest correlation to blooming date, and those duration was determined as q . D_r was determined from q as about 25 th day at the sites in Yamagata and Niigata prefectures, and the range of 40–55 th day at most of sites in other areas.

3. The DTS accumulation model to estimate blooming date of *P. yedoensis* was developed. DTS is the index which relatively expresses the velocities of growth or development of plants under a certain temperature condition, when that under a specific standard temperature (25°C was used in this study, though it is found as not so proper value) is set as normal. Daily mean temperature data is transformed to DTS value by using Arrhenius' equation, and DTS distribution is expressed by exponential function of temperature. In order to estimate blooming date as accurate as possible, it is necessary to determine the adequate values of starting date of DTS accumulation and temperature characteristic E_a which is a parameter in the exponential function of temperature. The value of E_a for flower buds development was determined using cut shoots of *P. yedoensis* forced in greenhouse. As the result of analysis by the use of Arrhenius plots, 16.8 kcal mol⁻¹ was obtained as mean value of E_a .

Then, estimations of blooming dates for *P. yedoensis* at 38 meteorological stations in Japan were made. DTS values are accumulated from a starting date, the estimated blooming date is the date when DTS accumulations reach at mean accumulations of DTS on observed blooming date for the site.

The adequate starting date D_s at each station was determined from error analysis. At many stations, D_s lies between 40 and 55 th day from 1 Jan. It was found that 17 kcal mol⁻¹ for E_a gives minimum error when averaged over all stations. Using this value of E_a (17 kcal mol⁻¹) and starting date D_s , computation was made to estimate blooming dates between 1961 and 1985. It was shown that, at stations in Hokkaido and Tohoku districts, RMSE between the observed and estimated blooming dates fell within 1–2 days, and at stations in other areas RMSE ranged between 2 and 3 days, except for Hachijo I. where it became 6.64 days.

4. Large RMSE in warm regions seemed to be due to the large interannual variation of the process of rest break of flower bud in late winter. An adjustment of estimation of blooming date at southern sites was made by applying the concept of chill-unit which is the weighted hour corresponding to the effectiveness chilling to rest completion. It was shown that this procedure reduced RMSE for blooming dates from 6.64 days to 2.32 days at Hachijo I. Errors were reduced to about 2 days at all stations in warm regions.

5. The procedure of estimation mentioned above was rather complex, because the optimum starting date and the mean DTS accumulations for each site were necessary to be

determined. The method of estimation can be considerably simplified by using the common DTS accumulation value (8 days) and the starting date computed by the multiple regression for the corresponding DTS accumulation values. This simplified method was tested at 20 meteorological observatories which were not used to determine common DTS accumulations. RMSE were within 1-3 days except for a few sites in Kanto and Tohoku districts. The method was applied to estimate blooming dates at the parks in western Japan noted for the cherry blossoms. It was shown that accuracies of 2-3 days of RMSE were obtained to the parks where daily mean temperature data were available within 4-5 km.

6. The influences of the urban warming on blooming dates at three large cities in Japan, was evaluated by means of the DTS method. The evaluation was made by comparison of estimated blooming dates using temperature from which urban warming effect was eliminated, with that using observed temperature. It was clear that quickenings of blooming dates attributed to urban warming had appeared since 1920's at Tokyo and since 1960's at Osaka. In the recent 30 years, this quickenings of blooming had increased at the rates of 0.15 days year⁻¹ for Tokyo and 0.14 days year⁻¹ for Osaka. In early 1980's, mean quickenings were evaluated as 7.8, 4.6 and 4.8 days at Tokyo, Osaka and Kyoto respectively.

7. An attempt to simulate the impact of global warming to distribution of blooming date in Japan was made by using the DTS method. For the 2°C uniform warming, estimated mean blooming dates will be earlier than those at present by 10-12 days in Hokkaido and Tohoku districts, by 5-6 days in Kinki and Chugoku districts, and by 0-2 days in Kyushu district. This suggests that global warming of the order of 2°C will decrease the difference in blooming dates between northern and southern regions of Japan.

目 次

第 I 章 序 論	161
第 II 章 ソメイヨシノの開花に関する一般的知見	161
第 1 節 生物季節観測について	161
第 2 節 ソメイヨシノの開花に関する生理・生態的特徴	162
第 3 節 開花日分布パターンの特徴	162
第 4 節 開花日変動の特徴	164
第 5 節 ま と め	165
第 III 章 単回帰分析ならびに有効積算気温による開花日の解析	165
第 1 節 単回帰分析による起算日決定の試み	165
従来の回帰分析による開花日予想方法	165
データおよび解析方法	166
結果および考察	167
第 2 節 有効積算気温による開花日推定の試み	167
従来の積算温度による開花日の推定	167
データおよび解析方法	167
結果および考察	167
第 3 節 ま と め	168
第 IV 章 温度変換日数による開花期の解析	168
第 1 節 温度変換日数について	169
第 2 節 切り枝水挿し法による温度特性値決定の試み	170
材料および方法	170
結果および考察	171
第 3 節 温度変換日数法による全国の開花日推定	172
推定方法	172
結果および考察	172
第 4 節 ま と め	175
第 V 章 温度変換日数モデルにおける推定誤差の補正	175
第 1 節 平均積算値修正による精度の改善	175
第 2 節 休眠打破の進み方の年次間差に関する補正	175
補正方法	176
結果および考察	176
第 3 節 ま と め	178
第 VI 章 温度変換日数モデルの簡便化と開花予想	179
第 1 節 簡便法による開花日の推定	179
起算日の決定	179
簡便法による開花日の推定結果	180
第 2 節 開花日の予想	181
開花日の予想方法	181
予想結果および考察	182
第 3 節 ま と め	182
第 VII 章 気候解析への温度変換日数モデルの応用	183

第1節 都市の昇温の解析への影響評価	183
解析方法	183
結果および考察	183
第2節 開花日分布に関するシミュレーションの試み	186
解析方法	186
結果および考察	186
第3節 ま と め	188
第VIII章 結 論	188
謝 辞	189
使 用 記 号	189
引 用 文 献	190

第 I 章 序 論

ソメイヨシノはわが国のサクラの代表的な園芸種で、九州から北海道の中部までの広い範囲に分布している。わが国では 19 世紀後半の近代気象観測の開始と同時に、季節による動植物の生態や形態の変化の発生を記録する生物季節観測が、欧米にならって始められ今日に至っている¹⁾。ソメイヨシノについては開花日と満開日が記録されているが、とくにその開花日については、各種生物季節の観測項目の中で、最も欠測の少ない長期にわたる観測データが多数の地点について整理されている²⁾。

ソメイヨシノの開花については、長年にわたる豊富なデータがあるばかりでなく、その予想への関心も高いことから、これについて非常に多くの研究がなされてきた。たとえば開花日を推定・予想する目的から、単回帰式を用いる方法³⁻⁹⁾、重回帰式など多項式を用いる方法¹⁰⁻¹²⁾、そして積算気温を用いる方法¹³⁻¹⁵⁾が検討され、それぞれについてかなり精度の高い推定・予想式が提案されている。これらの研究は、ソメイヨシノの開花日の変動が、春先の気温の推移のみによってかなり正確に計算できることを示しており、その幾つかは今日でも気象官署によるサクラの開花予想に使われている。しかし、これらによって得られた式は、対象とした地点・地域以外には適用できない。その理由は、一地点あるいはごく狭い一地域の開花データを用いて求められた経験式であることによる。

一方、サクラの開花日や満開日の分布についても沢山の調査研究がなされている¹⁶⁻²⁵⁾。しかし、開花日の分布の年による違いを系統的に研究した例は少ない。わが国とその周辺のスメイヨシノの開花に気温が影響する期間には地域差があることを示した例はあるが^{26,27)}、一般化された開花予想式を導くには至っていない。開花と気温の関係について地理的分布をも説明し得る一般化された計算式を見出すことができれば、全国的な視点からの開花日の毎年の変動の理解が可能になり、さらには都市気候あるいは地球温暖化のスメイヨシノの開花に及ぼす影響の評価さえ可能になる。

最近、開花前の果樹の花芽発達速度と気温との関係が、指数関数型の関係式（アレニウスの式）により近似的に表せ、これを用いた指数である温度変換

日数の積算値を使うと、リンゴ、ナシ、モモ、ウンシュウミカンなどについて、それまで用いられてきた積算気温よりも高い精度で開花日を予測できることが示された²⁸⁻³¹⁾。これらの研究は、この指数を用いることによって、ソメイヨシノの開花について国内全地点に適用できる一般化された予想式を作ることが可能なことを示唆するものである。

本研究では、温度変換日数を用いて、まず一般化されたソメイヨシノの開花日の推定式を作り、これを用いてわが国におけるサクラの開花と気温変動の間にみられる地域差を明らかにした。次にその応用として、サクラの名所など、開花日の長期的な累年資料のない地点における開花日計算方法の開発、都市ヒートアイランドの開花に及ぼす影響評価、さらには今日注目されている地球温暖化がソメイヨシノの開花に及ぼす影響の推定を試みた。

なお、本論文は既報³²⁻³⁵⁾を取りまとめ、平成 3 年に大阪府立大学に提出した学位請求論文の概要である。

第 II 章 ソメイヨシノの開花に関する一般的知見

本章では、まず日本における生物季節観測の沿革や現状について述べ、生物季節データを扱う場合の注意点について検討する。引き続き、ソメイヨシノの花芽の休眠およびおよび発達生理・生態的特徴、開花日の分布パターンの特徴、開花日の変動の地域的特徴に関するこれまでの知見を整理・検討し、開花日推定モデルの作成に考慮すべき点について考察する。

第 1 節 生物季節観測について

生物季節現象とは、気象の季節変化にともなって動植物がほぼ一年周期に示す生態や形態の変化のことである。こうした生物季節現象の現れる時期は年毎の気象条件によって変動する。サクラの開花時期が開花前の気温の影響を受けることは以前から経験的に知られており、農業、漁業、養蚕の作業適期の目安にもなってきた³⁶⁾。また生物季節観測の結果は他に、害虫駆除、農業気象災害の危険地判定、防疫、養蜂などに応用することもできる³⁷⁾。しかし、こうした応用の目的で生物季節現象を解析したり、また生物季節現象の計算モデルを開発するには、組織的な観測網による長期の生物季節データが必要である。

特定の生物季節現象を解析するには i) 多くの地点で, ii) 一定の観測基準に基づき, iii) なるべく長期にわたって観測されたデータ, を用いるのが望ましいと考えられている。日本では 1880 年代以降, 生物季節現象が観測されてきた。1925 年からは中央気象台が全国の生物季節に関する報告を集計するようになり¹⁾, 日本の生物季節観測網はこの時点でほぼ完成したといえる。

ただ, 1950 年代前半までは, 各気象官署で行われていた生物季節観測の種目がまちまちであり, 加えて, 同じ種目でも観測方法や判定基準に, 気象官署間で若干の違いがみられた。こうした地点間の差をなくすために, 中央気象台では 1953 年に新たな生物季節観測指針を制定した。これは以降二度にわたり改正されたが, ソメイヨシノの開花日については当時の基準から変わっていない。なお観測指針では, ソメイヨシノの開花日は標本木の花芽のうち数輪が開花した日と定められている。

現在, 日本全国で生物季節を観測している気象官署の数は 102, 植物季節の規定観測項目は 16 項目である。ソメイヨシノの開花日は, 特に重要な植物季節現象として扱われており, 他の項目に比べて欠測数が極めて少なく観測年数が多い。さらにこうして得られたソメイヨシノの開花日は特定の観測基準による一連の時系列データとして扱える。こうした特徴を持ったソメイヨシノの開花日のデータは, 気象官署の気温データと組み合わせて分析することにより, 開花日の変動を気候学的に評価するのに適した資料になる。なお, より詳細な開花日の分布を求めるには, 気象官署のデータに加えて, 新聞記事や現地調査の開花日のデータが必要である。

第 2 節 ソメイヨシノの開花に関する生理・生態的特徴

ソメイヨシノは, オオシマザクラとエドヒガンとの自然交雑により生まれた園芸種である^{38,39)}。19 世紀後半以降に急速に各地へ広まり, 現在は南西諸島や小笠原列島, 北海道の東部, 北部を除く日本全国で見ることのできる, 極めて一般的な園芸用の花木である。

サクラの場合, 開花前年の夏に花芽分化が始めるが, 雌蕊 (または胚珠) を形成する 9~10 月には自発休眠期に入り, 花芽発達はほとんど停止する^{40,41)}。サクラの花芽は自発休眠の状態越冬するが, この

休眠を終えるには低温に遭遇する必要がある。サクラの休眠打破に最適な低温の範囲は種によって異なるが, おおむね 5~10°C と言われている⁴²⁾。花芽はこうした低温に遭遇することによって, 休眠期から発達期へと徐々に移行してゆく。サクラ属の植物については, 低温が休眠打破に働く晩冬以後には高温にあった場合でも花芽発達が促進されたり⁴³⁾, 冬季には開花促成の開始時期を遅らせるほど開花までの日数が減少し開花率が増加する^{40,41)}といった現象が報告されているが, その理由も自発休眠が徐々に解除されることによるものと考えられる。

花芽発達はその後, 気温の上昇に伴って進み, 花粉形成, 開花へと続く。高砂⁴⁴⁾は, 千葉県柏市におけるソメイヨシノの花芽の伸長や重量増加が 2 月 10 日前後に始まることを示した。開花直前には花芽の重量増加⁴⁵⁾や花梗の伸長⁴⁶⁾に気温がかなり影響する。五井⁴⁷⁾はサクラの開花促成実験を通して, 花芽の分化後の発達が温度に大きく左右されると結論づけた。ソメイヨシノの開花時期には, こうした冬季から春季にかけての気温の推移が複雑に影響するとみられている。

第 3 節 開花日分布パターンの特徴

図 1 に日本とその周辺のソメイヨシノの平年開花日の分布を示す^{2,48)}。平年の開花日は高知と延岡で通日 84 日 (3 月 25 日) と最も早い。さらに平年の開花等日線は通日 90 日 (3 月 31 日) に九州から関東地方の太平洋沿岸まで, 通日 100 日 (4 月 10 日) には富山までの北陸地方や東北地方南部までそれぞれ北上する。気温の低い山岳部では開花が遅れ, 中部山岳地帯では通日 110 日 (4 月 20 日) 以後になる。この時期にはすでに, 秋田県, 岩手県の沿岸部で開花する地域が見られる。北海道では平年の開花が 5 月以降になる。

こうした開花日の等日線の密度は年によって変化する。これは北陸から関東, 東北地方にかけての地域で特に顕著に見られる。年毎の開花日分布を比較すると, たとえば 1986 年には等日線が新潟市付近から青森県北部 (下北半島) まで達するのに 10 日しかかからなかったのに対し, 1987 年には 20 日を要した (図 2)。これは主として, 開花直前の気温の推移の違いによるものと考えられる。高い気温が広域で長く続くほど, 開花日の等日線, いわゆる『サクラ前線』は早く北上し, 等日線同士の距離が広がると

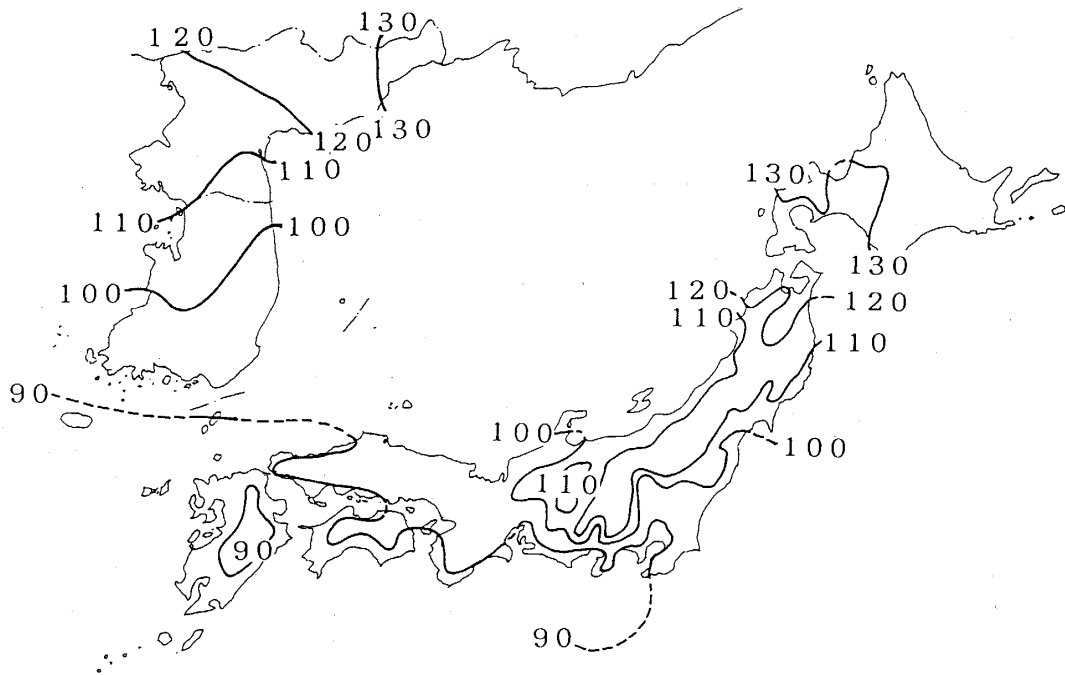


Fig. 1 Distribution of normals of blooming date for *Prunus yedoensis*^{2,46)}. Numbers for isophens are indicated in day of year.

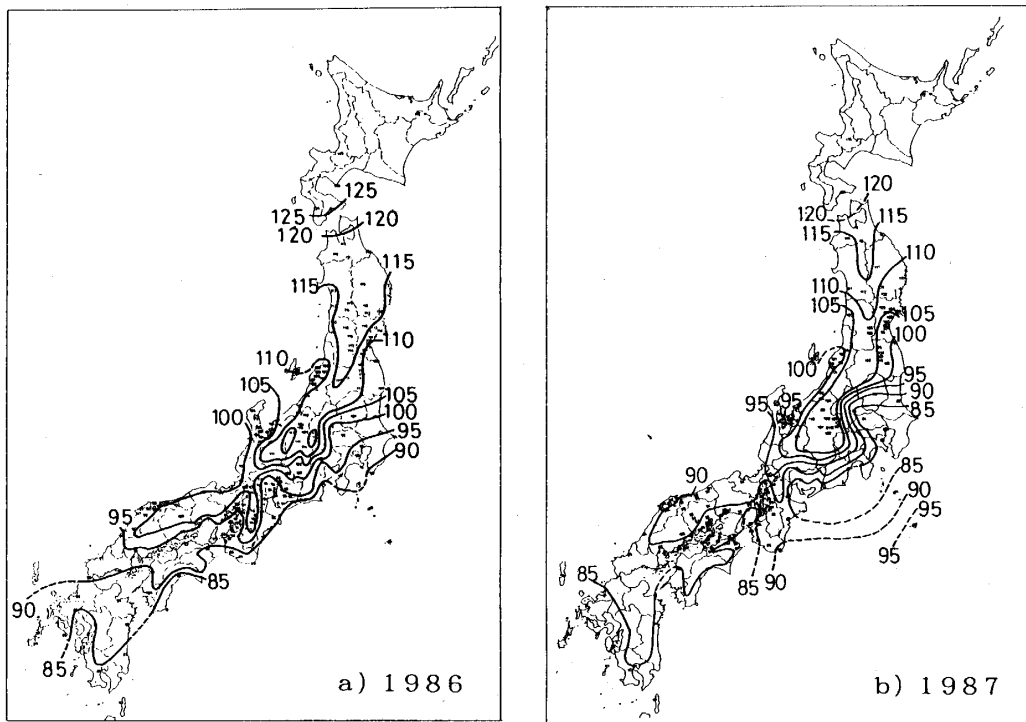


Fig. 2 Distributions of blooming dates of *P. yedoensis* in 1986(a) and in 1987(b). Blooming dates are indicated in day of year.

考えられる。

新潟県の佐渡や長崎県の対馬などの離島では、対岸の本土の地点よりも開花の遅れる傾向がある。こうした離島における開花の遅れは、海面水温の上昇

の遅れに関係しているとも言われている⁴⁷⁾。

伊豆諸島付近における等日線の分布の特徴は本土とかなり異なる。特に1987年にはこの付近で開花等日線が南下する現象が見られた(図2)。この地域以

外ではこれほど顕著な等日線の南下は見られない。生存南限に近い地域ではこのように暖かい地点ほど休眠完了が遅れ、開花日も遅くなると考えられる。

一方、都市ヒートアイランド内では、周辺よりかなり早く開花する傾向があり、特徴のある開花日分布パターンが形成される。1989年の大阪市内における、現地調査から得られた開花日分布を図3に示す。開花は温暖な都心部で最も早かった。特にこの年の早まりは顕著であったが、その理由は大阪市内の開花時期の気温が、この年に 10°C 内外と低いまま推移したことによる。こうした場合には、開花等日線の進み方も遅くなり結果的に都心と周辺の開花日の差が大きくなる。大阪市内ではこの他に、都心部の東側の大阪城公園周辺で形成されたクールアイランドによると見られる開花日の遅れ、気温が相対的に低いと思われる臨海部における開花日の遅れなども認められた。

都市ヒートアイランドによる開花の早まりは他の都市についても見られる。東京の都心における開花の早まりはすでに1920年代に見出されている¹⁶⁾。1940年代になって市内における開花の早まりはさ

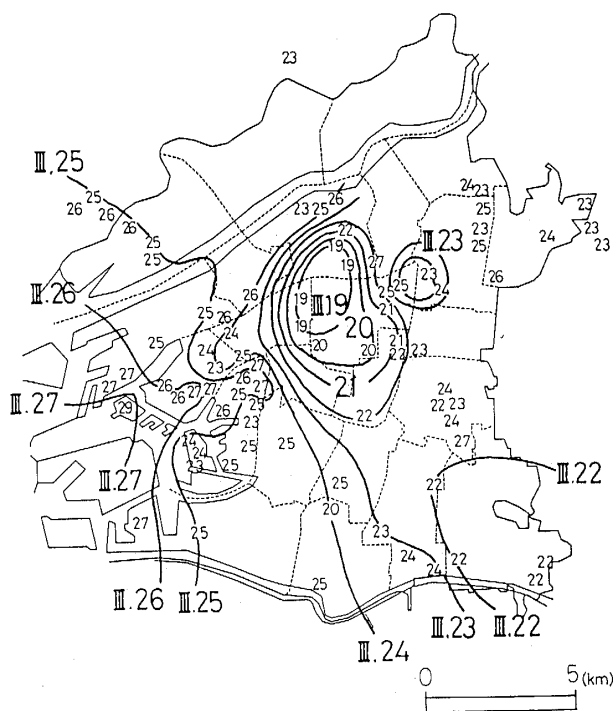


Fig. 3 Distribution of blooming dates of *P. yedoensis* in Osaka city in March 1989. Numbers are the first blooming dates (large numbers are for isophens, small numbers are dates plotted at the observed sites).

らに顕著となり、都心と郊外の差が最大5日に達した年もあった²¹⁾。1950年代には開花日の都心-郊外間の差が2~3日程度とされたが²³⁻²⁵⁾、現在では開花の相対的に早い地域が大きく広がり、都心-郊外間の差も当時より大きくなっていると見られる。

都市以外では、局地的な開花日分布について以下のような特徴も報告されている。植野⁴⁸⁾は、筑波山山腹のソメイヨシノの開花が山麓や山頂付近の開花より早くなることを示した。この原因はおそらく斜面温暖帯の影響と考えられる。関口・榛葉⁴⁹⁾は、卓越風が崖に遮られる扇状地内の谷においてヒガンザクラの開花が早まることを示した。また高砂⁴⁴⁾は、ソメイヨシノの開花時期が建造物との相対的な位置関係の影響をかなり受けることを示した。ソメイヨシノの開花日の分布は、樹木周辺の地形や建造物などによっても影響される。

第4節 開花日変動の特徴

ソメイヨシノの開花日の変動の特徴は地域によって多少異なる。開花日の標準偏差は北陸~九州地方にかけては3.5~5日と小さいが、北海道地方や東北の太平洋沿岸の地域、および種子島、八丈島といった生存北限または南限に近い地域では5日以上と大きくなる(図4)。

こうした開花日の変動の大きさに加えて、開花日の長期的な変化傾向にも地域差が見られる。1956~85年の過去30年間には、西日本では全般的に開花日の早まる傾向が、東日本では逆に遅れる傾向が見られた。気象庁⁵⁰⁾は、西日本で春先の気温が上昇傾向にあるのに対し、東日本では下降傾向にあるとしており、過去30年間の開花日の変化傾向はこれらを

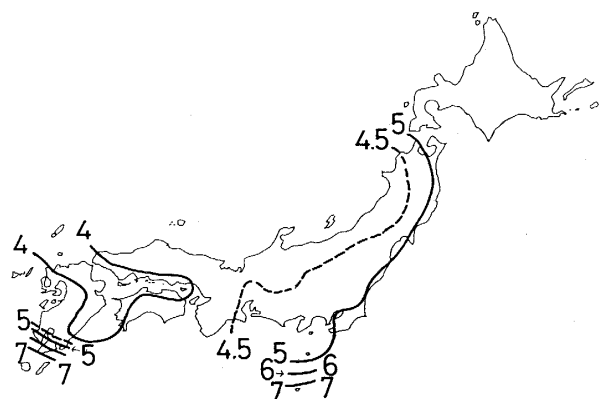


Fig. 4 Distribution of standard deviation of blooming date (1961-85).

反映したものと思われる。また東京など、大都市の観測所の開花日は、周辺の地点に比べて相対的に早くなってきていることが分かった。

種子島や八丈島の開花日は、本土各地点の開花日に比べて大きく変動する。これらの地域では本土よりもかなり温暖なことから休眠打破がかなり遅れ、花芽発達の時期にも休眠の影響が残ることが予想される。これにより気温に対する花芽の応答が複雑になり、開花日の変動が本土よりかなり大きくなったものと思われる。

サクラの開花日の変動の大きさを種類別に比べると、ソメイヨシノの開花日の変動が他の種より小さい傾向がみられた。休眠の影響が開花時期近くまで残る種類の場合、伊豆諸島のソメイヨシノのように開花日の変動がかなり大きくなると思われる。ソメイヨシノの開花日の変動が相対的に小さいことは、休眠の影響が開花時期まで比較的残りにくく、本土では花芽の発達期の気温を適切に考慮すればかなり正確に開花日の推定が可能であることを示唆している。

第5節 ま と め

本章では生物季節観測とソメイヨシノの開花日の特徴の関する過去の知見を整理・考察した。ここで得られた結果は以下の通りである。

生物季節現象の解析には、多くの地点で長期にわたり、同じ基準の下に観測された生物季節データを必要とする。現在、気象官署で観測されているソメイヨシノの開花日は、観測基準の一貫性やデータの豊富さ、欠測の少なさから考えて、開花時期の気候学的な解析に使用するのに適切な生物季節現象といえる。

ソメイヨシノの花芽は、夏～秋季に分化・形成を始め、9～10月に一旦、自発休眠期に入る。自発休眠は5°C周辺の低温に遭遇することによって次第に解除され、これにともない花芽発達へと移行する。花芽重量の増加や花梗の伸長といった可視的な花芽の発達が本格的に始まるのは、たとえば関東以西では2月中旬以降とされる。

開花日の分布や変動の特徴を検討した結果、開花日の分布パターンが開花前の気温推移や気温分布をかなり明確に反映することなどから、開花日の遅速が開花前の気温と密接な関係にあることが分かった。また、伊豆諸島などの生存南限付近以外では、

開花時期に休眠の影響が余り出ないと考えられた。これより花芽発達期の気温を使えば開花日のある程度高い精度で推定できることが予想される。

第III章 単回帰分析ならびに有効積算気温による開花日の解析

気温データを用いたソメイヨシノの開花時期の予想・推定のこれまでの試みでは、i)回帰式による方法、ii)積算温度による方法、の2つが主として使用されている。本章ではこれらの計算方法を用いて開花日の変動の予備的評価を試みた結果について述べる。うち、i)については単回帰分析を使用して各地の気温が開花に最も影響している期間を求める。またii)についてはこれまで一般に用いられている有効積算気温を使用して、開花日の計算精度や各地の積算方法の統一の可能性について検討する。

第1節 回帰分析による起算日決定の試み

従来の回帰分析による開花日予想方法：回帰式を使ったソメイヨシノの開花予想は、石田³⁾が東京について行ったものが最初で、以来、多くの研究者によって試みられてきた^{4-12,51,52)}。回帰予想式では平均気温が説明変数、開花日が従属変数とされ、気温によって開花日を一つの関係式で簡単に計算できる特徴を持つ。これまで提案された予想式からは、いずれも精度のかなり高い結果が得られた。ところが、たとえば単回帰予想式の場合、開花に気温が最も影響する期間が地点間で異なるので、式の説明変数に使うべき平均気温の計算期間も違ってくる。したがって、ある地点で求められた予想式を、気温の影響する期間が異なる別の地点では使えない。これは重回帰式の場合でも同様である。このように、回帰予想式による開花日の計算方法には、一つの予想式が注目の地点以外に使用できないという難点があり、各地の予想式を系統的にまとめることも困難となる。以上から回帰予想式は、統一された方法による開花日の推定に適さないと考えられる。

ところで精度の高い予想のためには、開花日との間に高い相関のある平均気温を使用する必要がある。単回帰分析の場合には任意の起算日からの平均気温と開花日との回帰分析を繰り返し、最も相関の高くなった場合の気温の起算日を採用することが多かった⁶⁻⁸⁾。したがって、単回帰分析は開花に気温が影響し始める時期の決定に利用できる方法と言え

る。このようにして決定される起算日は、温度変換日数法における起算日決定の参考にすることもできる。そこで、単回帰分析を使って、開花に気温が影響し始める時期を予備評価した。

データおよび解析方法：解析には全国38地点の気象官署による1961~85年の開花日と日平均気温のデータを用いた。ここでは、気温の平均期間を開花日と前日の2日分から1日毎に遡って増やし、そ

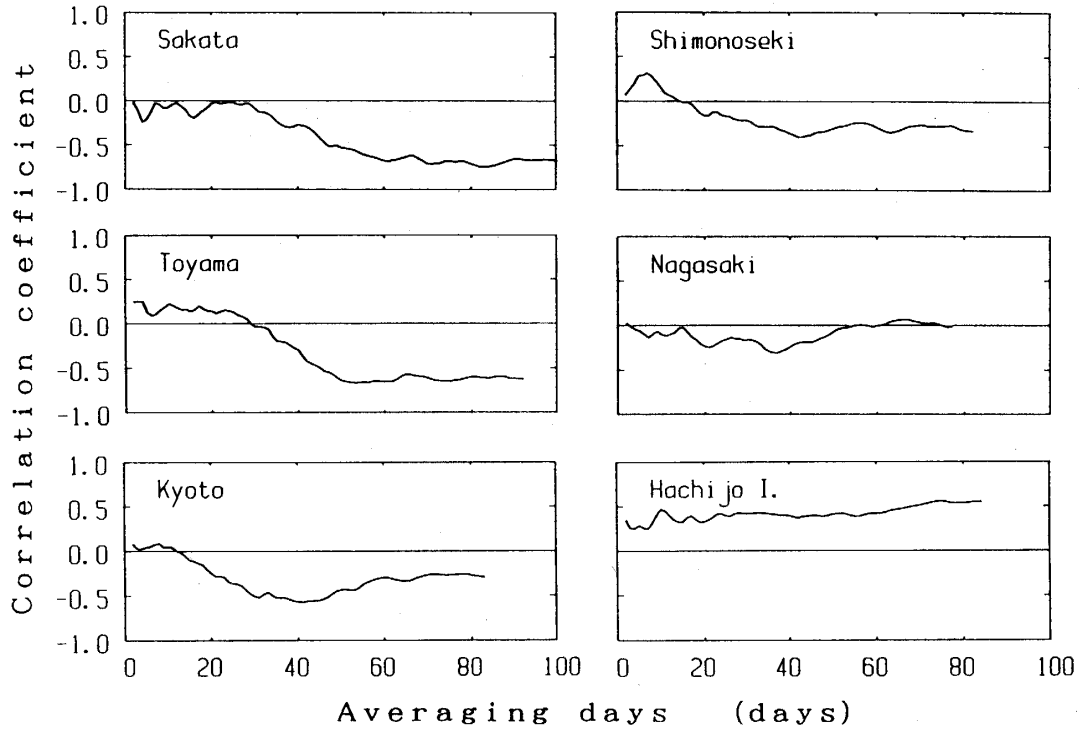


Fig. 5 Examples of the correlation coefficient between blooming date in each year and temperature averaged over the days before blooming at six stations.

Table 1. The duration q , during which the temperature affects blooming date at each station, which was determined by means of linear regression analysis. Starting date D_r , the average beginning point of q at each station, is also shown.

Station	q	D_r	Station	q	D_r	Station	q	D_r
	(days)	(day of year)		(days)	(day of year)		(days)	(day of year)
Muroran †			Nagoya	43	48	Hikone	50	47
Hakodate †			Kofu	45	48	Shimonoseki	42	49
Hachinohe †			Choshi	44	49	Hiroshima	43	49
Akita †			Hamamatsu	41	49	Osaka	42	50
Sakata	82	27	Shizuoka	27	62	Saga	40	48
Onahama †			Tokyo	46	44	Oita	27	62
Aikawa	82	23	Owase	41	49	Nagasaki	37	50
Niigata	81	24	Yokohama	52	39	Kumamoto	38	49
Toyama	53	48	Hachi jo I. †			Miyazaki	20	67
Matsumoto †			Saigo	51	47	Takamatsu	44	48
Maebashi	46	48	Yonago	49	46	Kochi	36	49
Mito	48	50	Tottori	50	45	Tokushima	48	49
Tsuruga	48	50	Kyoto	41	53			

†: Station at which the best negative correlation maximum is unable to be defined clearly.

れぞれの場合における平均気温と開花日間の相関を求めた。このときの相関係数から、気温を開花日まで何日間平均すると開花日との相関が最も高くなるかを求めた。最も高い相関を与えた気温の平均日数を q としたとき、 q の平均的な始まり(起算日 D_r) は次の式から計算される。

$$D_r = BD_m - (q - 1) \quad (1)$$

ここで BD_m は 1961~85 年の平均開花日(通日)である。以上の手順に従い、地点別に D_r の決定を試みた。

結果および考察：各地の気温の平均期間に伴う気温-開花日間の相関係数の推移の例を図 5 に示す。気温と開花日間の相関は通常負になるので、この図の曲線の極小に当たる日数が q となる。 q の値は酒田、新潟、相川では 80 日間以上であるが、関東以西の地点では q が少なくなって 35~50 日間の範囲となった。なお、室蘭、秋田など寒冷地 6 地点、それに八丈島では q を見出せず、 D_r を決めることはできなかった。

D_r の計算結果を表 1 に示す。酒田、相川、新潟では通日 30 日以前、それ以西の多くの地点では通日 40~55 日(2 月中~下旬)であった。今回決定された起算日 D_r は、石田³⁾、榎谷⁷⁾、篠原²⁶⁾などが求めた各地の起算日や、高砂⁴⁴⁾による花芽の重量・長径の増加の始まる時期と概ね一致しており、この解析方法によって、開花に気温の影響し始める時期が比較的正確に評価されたものと考えられる。

第 2 節 有効積算気温による開花日推定の試み

従来の積算温度による開花日の推定：植物の開花時期などの推定には、積算温度による方法も用いられてきた。これはある起算日から、たとえば開花日までの基準値以上の温度の積算値が一定であると仮定し、各年の積算温度がこの平均値に達する日を推定開花日とする方法である。

この方法は、これまで種々の植物の開花期・収穫期の変動を解析する目的で使用されてきた^{14,15,53-57)}。積算温度による方法では、推定に適切な起算日と基準温度 α を決める必要がある。この方法をソメイヨシノの開花日の推定に適用する場合、開花に気温の影響し始める時期には地域差があるので、適切な起算日については地点毎に決めねばならない。しかし同じ種の場合、各地で同じ α の値を用いた共通の積算方法によって、全国共通の推定方法を開発できると考えられる。過去には地点毎、樹種

毎に多くの α の値が報告されてきた^{14,15,53-56,58)}。これらの研究により、地点毎に適切な起算日と α を使うとかなり精度の高い推定結果が得られることが示された。そこで、積算温度の一種である有効積算気温を使用し、全国のいくつかの地点について開花日の推定を試みた。さらにそこで適切と思われる基準温度 α の値を地点毎に選び、全国共通の適切な α の決定への可能性とその問題点について検討した。

データおよび解析方法：有効積算気温による開花日の推定を全国 12 地点を対象に、1961~85 年の 25 年間について行った。解析データには、気象官署による開花日と日平均気温を用いた。

ある起算日 (D) から開花日までの有効積算気温は、基準温度 α 以上の日平均気温を積算して求める。ある j 年 i 日の日平均気温を $T_{i,j}$ 、 j 年の開花日を BD_j とした場合に、この年の有効積算気温 DD_j は以下の式から計算される。

$$DD_j = \sum_{i=D}^{BD_j} (T_{i,j} - \alpha) \quad (2)$$

ここでは DD_j の 1961~85 年の 25 年平均値 \overline{DD}_{25} を計算し、 D 以後の有効積算気温が \overline{DD}_{25} に達した日を年毎に見出して、推定開花日とした。本研究では、通日 1~75 日の 1 日間隔の D と、 $-2 \sim 12^\circ\text{C}$ の 0.2°C 間隔の α を使って、地点毎に全ての組合せについて推定を行った。推定誤差は MSE (平均二乗誤差) とその平方根の値の RMSE で表した。

各地で適切な α を決定する目的で、誤差を最小にした起算日 (D_c) と基準温度の組合せを地点毎に求めた。そしてこの組合せのうちの α の値を既往の研究結果などと比較し、さらに α を全国的に統一した積算モデルの作成の可能性について検討した。

結果および考察：起算日と α の組合せによる一般的な推定精度は、寒冷地ほど高かった。表 2 には、最小の推定誤差を与えた各地の (D_c, α) の組合せとそのときの RMSE を示す。この組合せによる RMSE は長崎を除けば 1~3 日の範囲であり、かなり精度の高い推定が可能であることが分かった。各地の D_c は大阪と富山を除けば、第 1 節で求めた起算日 D_r と同じかそれよりやや早かった。また、このときの基準温度は 12 地点中 8 地点で 0°C 以下と、全国的に低くなった。この結果は、サクラの基準温度としての既往の研究結果(概ね $0 \sim 5^\circ\text{C}$ の範囲^{15,41,42)} よりかなり低い。

Table 2. The combination of starting date D_c and base temperature α which gave most accurate estimation at each station.

Station	D_c (day of year)	α (°C)	RMSE (days)
Akita	45	-1.8	1.54
Toyama	49	-2.0	1.37
Nagoya	45	-1.8	1.73
Hamamatsu	45	-0.8	2.33
Tokyo	44	1.8	2.00
Kyoto	50	-1.2	1.95
Hikone	43	-2.0	2.01
Hiroshima	49	-1.0	2.02
Osaka	62	5.4	1.86
Oita	50	-1.6	2.36
Nagasaki	45	1.4	3.06
Miyazaki	65	3.6	2.37

先にも述べたように、開花に気温が影響し始める時期には地域差があるので、表2の起算日 D_c にも大きな地点差があつて当然と言える。しかし、各地で同じソメイヨシノを対象としているにもかかわらず、適切な α として、系統的な傾向のない地点毎の値を使わなければ高い推定精度が得られないことから、この方法が一地点、あるいはその近くの限られた範囲でしか使えないことを意味すると考えられた。

従つて、本研究の目的の一つである、全国で共通に使用可能な精度の高い推定式を作るには、これまで一般的に用いられてきたものとは別の、気温を使った指数の積算モデルを新たに考える必要があると思われた。

第3節 ま と め

本章では、ソメイヨシノの開花日に関する解析を予備的に試み、これらによる開花日の計算方法について考察した。

回帰予想式による開花日の計算では、予想式に使う説明変数の平均気温を地点によって変える必要があることから、予想式を各地で統一された形式にまとめることは困難と考えられる。ここでは、開花の変動に気温が影響し始める時期 (D_r) を求める目的で、単回帰分析を試みた。 D_r は山形県～新潟県の各地点で通日 20～40 日、それ以西ではほぼ通日 40～55 日 (2月中～下旬) の範囲で見出された。

一方、積算温度による方法は、開花に気温の影響する時期の地点差があつても、全国的に統一された推定モデルにまとめられるものである。本章の後半では、全国 12 地点について有効積算気温を使った開花日の推定精度を検討し、適切な全国共通の基準温度 α の決定を試みた。解析の結果、各地の推定精度は RMSE が最小で 1～3 日とかなり良くなることもあったが、そのときの各地の α の値には系統的な地域性が認められず、共通の α を用いた精度の高い開花日の推定は困難と判断された。系統的な方法により開花日を推定するモデルを作成するには、さらに別の気温の指数を使った積算方法を導入する必要もあると考えられた。

第 IV 章 温度変換日数法による開花期の解析

全国で開花日の推定方法を系統的にまとめるには、同じ計算方法で異なった期間の気温の影響を評価し易い積算モデルを使用する方が適当と考えられる。前章で述べた有効積算気温は、植物の応答の温度上昇に伴う変化が線形と仮定された積算モデルである。しかしこの他にも、推定精度の改善を目的として、気温を使った非線形モデルが用いられた例がある⁵⁹⁻⁶¹⁾。これらの研究では、実験や植物季節観測を通して各植物の成長量と温度との関係が求められ、数式やノモグラムで表された。さらに小野ら²⁸⁻³⁰⁾は、温度変換日数という指数を積算する方法 (以下、温度変換日数法と呼ぶ) によって、多くの温帯果樹の開花日をかなり正確に推定できることを示した。この積算モデルでは、温度と植物応答とを関係づけるのに指数関数が使われており、この式中のパラメータ (温度特性値 E_a) を適切な値に設定することで、多くの植物への適用が可能になる。また、ソメイヨシノについてこのパラメータを全地点で揃えても地点毎の推定精度が余り低下しなければ、全国的に積算方法を統一することによりモデル化が可能になる。

この章では、温度変換日数法を用いたソメイヨシノの開花日の変動の解析を試みる。うち第1節では温度変換日数法を説明し、第2節では切り枝水挿し法によるソメイヨシノの開花促成実験に基づいて、温度変換日数の計算に用いるパラメータを決定する方法を検討する。第3節では、温度変換日数法によ

る開花日の推定を実際に試み、地点毎の適切な起算日の決定方法、温度変換日数への換算に使用するパラメータ（温度特性値）の全国共通の値などについて検討する。

第1節 温度変換日数について

温度変換日数とは、生物の生長や増殖の速度の、温度条件による変化の仕方を表す指数の一つである。これは、反応速度論において、反応速度定数(k)と絶対温度(T)との関係を表すアレニウスの式

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

が基となっている。ここで E_a は見かけの活性化エネルギー (cal mol^{-1})、 R はモル気体定数 ($1.987 \text{ cal deg}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) である。またここでは A を定数と考える。この式の E_a を実験的に求めるには、 T^{-1} と $\ln k$ との関係を作図するアレニウスプロットによるのが一般的である。金野²²⁾は、植物の発芽の平均相対速度（播種から発芽までの日数の逆数）と地温との関係が、このアレニウスプロットによって近似できることを示した。

金野・杉原²³⁾はこれに基づいて、生物活性と温度との関係を指標化する『温度変換日数』という指数を提案した。この温度変換日数は次の2つの前提に従って導かれた。

- i) 植物の生長速度（ここでは植物の生長ステ-

ジ間の所要時間の逆数を速度定数 k として考える)の温度に伴う変化が、アレニウスの式によって近似できること (式(3))。

ii) ある特定の変化に費やした時間 t と、そのときの速度定数 k との積が温度条件にかかわらず一定になること、すなわち、

$$kt = k't' = k''t'' = \dots = (\text{一定}) \quad (4)$$

(3)、(4)式により、ある i 日の平均温度 T_i の下で1日 (t_i) 要した植物側の変化の量が、特定の標準温度 (T_s) の条件での変化の何日分 (t_s) に相当するかが次の式から換算される。

$$t_s = t_i (k_i/k_s) = \exp\{E_a(T_i - T_s)/RT_i T_s\} \quad (5)$$

この t_s を標準温度 T_s に対する温度変換日数と呼んだ。

この温度変換日数はいい換えれば、標準温度での植物の変化速度を1としたときの、他の温度における変化の速度の相対値を表したものである (図6)。温度に対する温度変換日数の変化の仕方は E_a によって大きく変わる。なお、植物の生長などをアレニウスの式によって近似させる場合には、この E_a の値が植物の温度に対する感受性の数量化されたパラメータとされ、しばしば温度特性値と呼ばれる²⁹⁻³¹⁾。

小野ら³¹⁾は、ナシの催芽・開花までの芽の平均発育

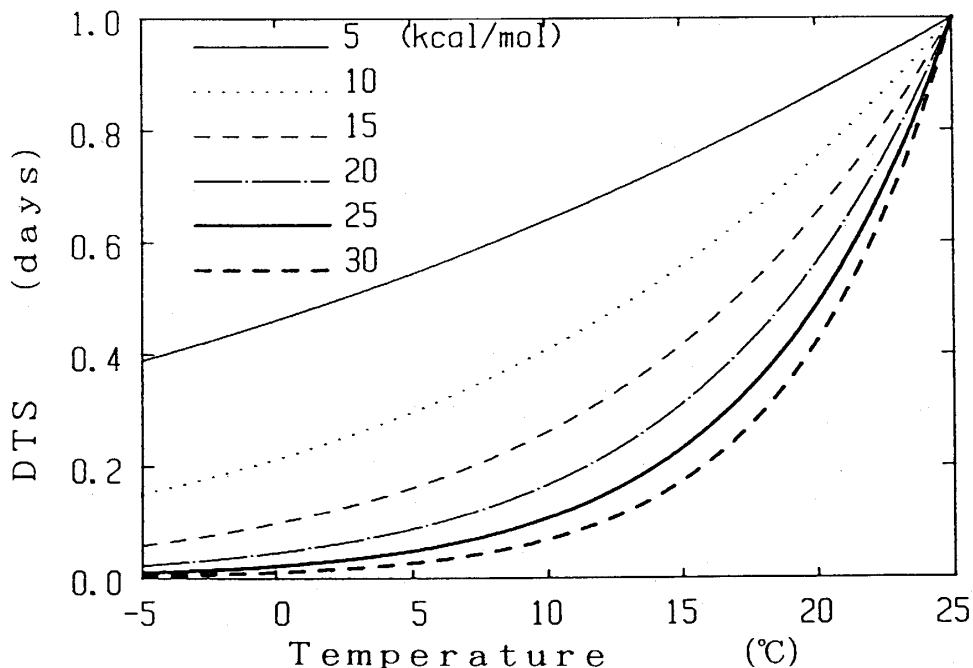


Fig. 6 Relationship between DTS calculated for various E_a and temperature.

速度（促成開始から催芽や開花までの日数の逆数）と温度との関係も、アレニウスの式によって近似的に表せることを示した。小野⁶⁴、小野ら²⁸⁻³⁰はこれに基づき、温度変換日数を積算する方法によって各種果樹の開花期の計算を試みた。温度変換日数は、各温度での変化の量を特定の標準温度の下での値に換算するものであるので、生長ステージ間の温度変換日数積算値は一定と仮定できる。そこでこの方法では、ある起算日から開花日までの平均積算値を求め、各年の積算値が平均積算値に達する日を推定開花日とする。この方法による推定精度はかなり良く、適切な E_a と起算日を使えば、リンゴ、ナシ、モモなどについては標準誤差で1~2日の精度が得られ、ウンシュウミカンやリンゴの場合には、有効積算気温を使った場合より精度が高くなると報告された⁶⁴。以上から、温帯果樹の花芽の生長速度と温度条件との関係をかなり正確に近似できるアレニウスの式に基づいた温度変換日数法を使うと、ソメイヨシノの開花日をかなり高い精度で推定できることが示唆される。

第2節 切り枝水挿し法による温度特性値決定の試み

温度変換日数による開花日の推定精度は起算日と E_a にかなり左右されると思われた。本研究では温度変換日数による開花日推定モデルの作成が目的なので、 E_a を実際の気候データから統計的に決める方法を考える必要がある。しかし、統計解析の結果と、実際の花芽の挙動が一致しているかは重要と考えられる。そこで切り枝水挿し法によるソメイヨシノの開花促成実験を行い、開花直前の花芽の伸長速度をアレニウスプロットを用いて解析し、花芽発達に関する E_a の予備的評価を試みた。

材料および方法：促成実験は1988年、1989年の2月20日から、各年の野外における開花期にかけて行った。ソメイヨシノの切り枝は1週間毎に、長さ30~40 cm、花芽数が10~20個のものを8本ずつ、本学構内から採取した。採取後は直ちに本学農場の温室内において促成を開始した。野外における開花期が近づく3月に入ってからは、花芽が赤く変色した段階に達した枝について、終日温室で促成したままの区（A区）、日中（毎日10~17時とした）だけ室外に置く区（B区）、夜間だけ室外に置く区（C区）、室外に放置する区（D区）に分けた。これは、切り

枝を異なった温度条件下に置く目的による。温室内外の切り枝周辺の気温は、熱電対式通風温度計により観測した。そしてそれぞれの枝が受けた気温条件に従って、15時から翌日14時にかけて、毎正時の気温を平均した24時間の平均気温を毎日について求めた。

開花直前には花梗の伸長が顕著で²⁴、またこの量が開花直前の気温に大きく影響される⁴⁵。そこで本実験では花芽の発達指標として、花梗の伸長に似た変化をと思われる花芽の長径を計測し、その伸長速度と温度との関係を解析することにした。1本の枝で5個ずつ計測する花芽を選んだ。計測は開

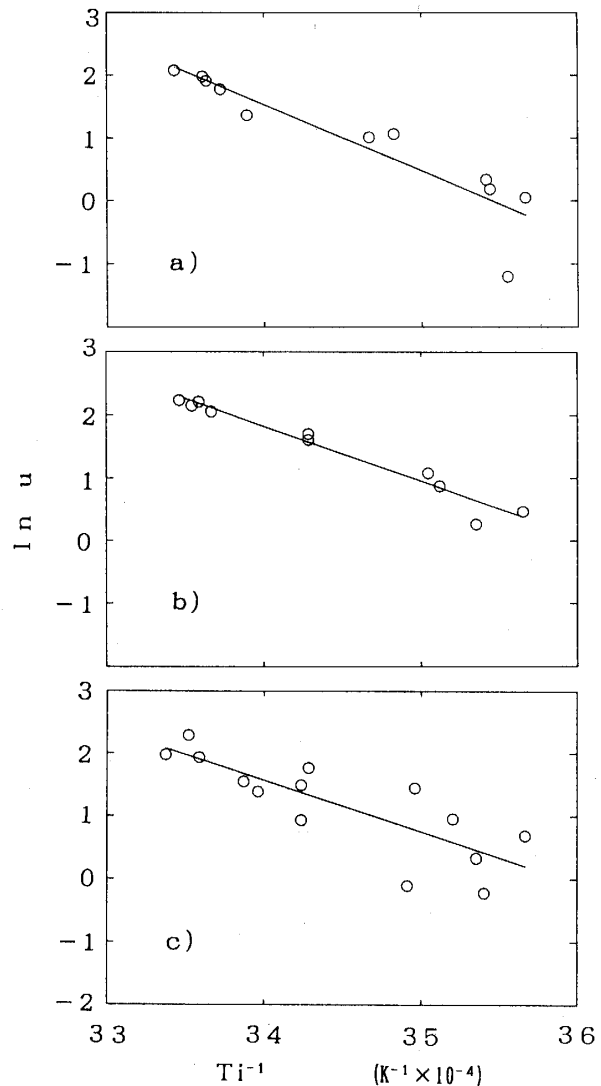


Fig. 7 Examples of Arrhenius plots of elongation in flower buds. Elongation was observed during forcing of cherry twigs in greenhouse. a: In case of $L_1=17-18$ mm, b: $L_1=22-23$ mm, c: $L_1=27-28$ mm.

Table 3. Temperature characteristic E_a determined from Arrhenius plots of elongations of flower buds for *Prunus yedoensis*. Arrhenius plot was drawn for each range of L_1 (the bud length before the elongation in 24 hr.) divided into 1 mm interval.

Range of L_1 (mm)	The number of data	† A (K)	‡ r	Temperature characteristic E_a (kcal mol ⁻¹)
12-13	35	-7455	-0.155 ^{NS}	14.81
13-14	14	-2199	-0.167 ^{NS}	4.37
14-15	13	-8183	-0.844 ^{***}	16.26
15-16	14	-9946	-0.920 ^{***}	19.76
16-17	9	-8511	-0.925 ^{***}	16.91
17-18	11	-10520	-0.917 ^{***}	20.90
18-19	11	-8340	-0.907 ^{***}	16.57
19-20	13	-9621	-0.922 ^{***}	19.12
20-21	14	-7030	-0.874 ^{***}	13.97
21-22	9	-8405	-0.990 ^{***}	16.70
22-23	10	-8696	-0.978 ^{***}	17.28
23-24	16	-8059	-0.868 ^{***}	16.01
24-25	6	-8845	-0.978 ^{***}	17.58
25-26	12	-7678	-0.935 ^{***}	15.26
26-27	8	-6298	-0.937 ^{***}	12.51
27-28	14	-8136	-0.810 ^{***}	16.17
28-29	9	-4475	-0.544 ^{NS}	8.89
29-30	7	-1424	-0.181 ^{NS}	2.83
30-31	9	-5478	-0.637 ^{NS}	10.89

***: Statistical significance at $P < 0.001$.

^{NS}: Not significant.

†: Regression coefficient on Arrhenius plot relating T_i^{-1} to $\ln u$.

‡: Correlation coefficient of each Arrhenius plot.

花日まで毎日 14~15 時の間にノギスを用いて行った。そのうちから、開花直前の長径が 30 mm 以上になり、通常とそれほど変わらず開花した 49 個の花芽を解析の対象とした。

伸長前と伸長後の花芽の長径 (各 L_1 と L_2) から、24 時間あたりの伸長量 (平均伸長速度 u) を計算した。伸長速度のデータは合計 239 日分について得られた。ただし、同じ条件でも長径が相対的に長くなるにつれ、伸長が少しずつ早くなる傾向にあった。そのため、12~32 mm の L_1 を 1 mm 間隔の範囲毎に分け、各場合で $\ln u$ と各花芽が受けた 24 時間平均気温 T_i (K) の逆数との関係、すなわち

$$\ln u = -(E_a/R)T_i^{-1} + C \quad (6)$$

をアレニウスプロットによって求め、各回帰係数が

ら E_a を計算した。

結果および考察：図 7 には $\ln u$ と T_i^{-1} によるアレニウスプロットの例を、また表 3 に花芽長径の範囲別に得られた両者の間の回帰係数や E_a の値を示す。 L_1 が 14 から 28 mm までの場合には、 $P < 0.1\%$ で有意であったが、28 mm 以上の場合は開花直前に伸長量の減少した花芽があったことから有意な関係は認められなかった。

L_1 が 14~28 mm の各回帰係数から求めた E_a の値は 12~21 kcal mol⁻¹ と変動した。しかし、このうち過半数の九つの場合から計算された E_a は 15~18 kcal mol⁻¹ の比較的狭い範囲内に入った。 $L_1 = 14$ ~28 mm の範囲の各回帰式から求めた E_a の平均値は約 16.8 kcal mol⁻¹ といった結果が得られた。

以上の解析から、ソメイヨシノの開花直前における花芽発達の E_a は、15~18 kcal mol⁻¹ (平均すれば 16.8 kcal mol⁻¹) の値が得られたが、この値が、統計的モデルによる開花日の推定において適切とされる値と一致するかは重要と考えられる。また、今回の実験では花芽の長径の伸長速度を花芽発達速度の指標としたが、小野ら³¹⁾が行ったような、インキュベーターなどを使用して求めた花芽発達の平均相対速度による解析の方が、より正確に E_a を求めることができよう。

第3節 温度変換日数法による全国の開花日推定

本節では、温度変換日数法により、ソメイヨシノの開花日の推定を試み、各地の適切な起算日の決定方法、精度の高い推定に使える全国共通の E_a などについて検討する。この結果に基づき、全国的に適用できる開花日推定モデルをまとめ、モデルによる推定誤差の原因について考察する。

推定方法：温度変換日数法による開花日の推定を、全国38地点について試みた。利用したデータは1961~85年の気象官署による開花日と日平均気温の観測値である。

ここでは、まず j 年 i 日 (日平均気温 $T_{i,j}$) における標準温度 T_s (本研究では 298 K: 25°C を用いた) への変換日数 $(t_s)_{i,j}$ を次の式で計算した。

$$(t_s)_{i,j} = \exp\{E_a (T_{i,j} - T_s) / RT_{i,j} T_s\} \quad (7)$$

このとき、ある起算日 D から各年の開花日までの25年間の平均積算値 (\overline{DTS}_{25}) を求める式は

$$\overline{DTS}_{25} = \left\{ \sum_{j=1}^{25} \sum_{i=D}^{BD_j} (t_s)_{i,j} \right\} / 25 \quad (8)$$

で表される。ここで BD_j は j 年の開花日、 D は任意の起算日である。この \overline{DTS}_{25} に温度変換日数の積算値が到達する日を毎年について見出し、推定開花日とした。推定精度は MSE (平均二乗誤差) とその平方根の値の RMSE で表した。

温度変換日数の計算には 5~30 kcal mol⁻¹ の 1 kcal mol⁻¹ 間隔の温度特性値 E_a と、通日 1~80 日 (暖地は 75 日) の 1 日間隔の起算日を使い、全ての組合せについて推定を試みた。本研究では、5~30 kcal mol⁻¹ のそれぞれの E_a による推定開花日の RMSE の平均値が最小になった起算日を推定に適切な日とし、これを D_s と呼ぶことにした。またこの D_s を使った開花日の推定において、全国の 38 地点で一般的に誤差を最も少なくする E_a の値を求め、共通の適切な温度特性値として決定した。こうして各地の推定計算の方法をある程度統一し、その際の各地の推定誤差の特徴について本節の最後で検討する。

結果および考察：図 8 に、38 地点の内の 6 地点について E_a と起算日の組合せによる MSE (平均二乗誤差) をプロットの濃淡で示す。推定誤差は一般的に寒冷地ほど小さく、2 (day)² 未満の MSE を表す図の空白部分の現れたほとんどの地点が寒冷地か日本海側に位置する。逆に、九州などの暖地では、推定精度が相対的に低くなり、とりわけ八丈島では図中

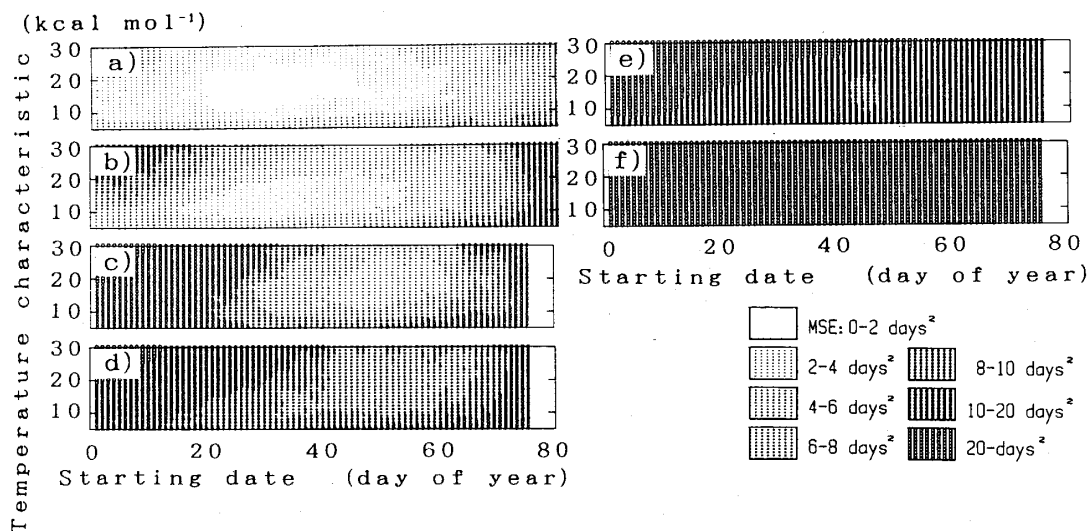


Fig. 8 Distribution of mean square error for various combinations of starting date and temperature characteristic (E_a). a: Sakata, b: Toyama, c: Kyoto d: Shimonoseki, e: Nagasaki, f: Hachijo I.

Table 4. D_s which are determined as suitable starting of DTS accumulation, and \overline{DTS}_{25} , the accumulations averaged over 1961-85 using the value of 17 kcal mol^{-1} of E_a , are given. Accuracy in estimation using these value each station is also shown.

Station	D_s	\overline{DTS}_{25}	RMSE	Station	D_s	\overline{DTS}_{25}	RMSE	Station	D_s	\overline{DTS}_{25}	RMSE
(day of year)	(days)	(days)	(days)	(day of year)	(days)	(days)	(days)	(day of year)	(days)	(days)	(days)
Muroran	64	8.16	1.99	Nagoya	45	7.37	1.92	Hikone	43	7.67	1.83
Hakodate	13	10.81	1.56	Kofu	44	7.32	1.50	Shimonoseki	49	7.81	2.55
Hachinohe	16	10.46	1.51	Choshi	47	8.59	2.59	Hiroshima	51	6.93	2.24
Akita	3	11.31	1.27	Hamamatsu	45	8.17	2.20	Osaka	50	7.85	2.21
Sakata	30	9.37	1.18	Shizuoka	45	8.74	2.11	Saga	49	7.48	2.43
Onahama	45	8.26	1.83	Tokyo	46	7.80	2.52	Oita	63	5.25	2.54
Aikawa	35	9.61	1.25	Owase	49	7.96	1.97	Nagasaki	45	8.52	3.03
Niigata	34	9.34	1.25	Yokohama	41	8.34	1.83	Kumamoto	44	8.25	2.30
Toyama	45	8.13	1.70	Hachijo I.	59	10.24	6.64	Miyazaki	64	5.75	2.39
Matsumoto	20	9.22	1.56	Saigo	44	8.09	2.11	Takamatsu	44	8.02	1.89
Maebashi	45	7.25	1.82	Yonago	43	8.14	1.23	Kochi	49	7.30	2.56
Mito	43	7.93	1.47	Tottori	43	8.12	1.70	Tokushima	49	7.61	2.67
Tsuruga	45	8.51	1.46	Kyoto	51	7.31	2.16				

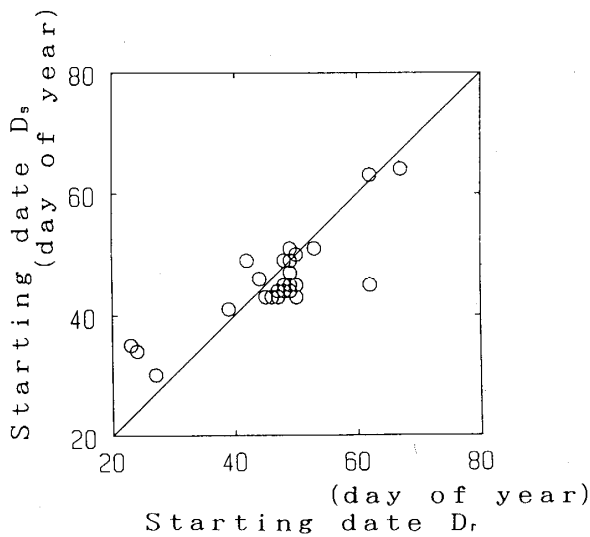


Fig. 9 Relationship between starting date D_s and D_r .

に MSE が 20 (day)^2 以下となる組合せが全くなかった。

各地の D_s (平均の RMSE を最小とした起算日) はかなり異なった (表 4)。北海道～東北地方北部では D_s が通日 20 日以前 (1 月上, 中旬), 東北南部, 長野県, 新潟県の各地域では通日 20~40 日 (1 月下旬, 2 月上旬), それ以南の地点では概ね通日 40~55 日 (2 月中下旬) の範囲となった。38 地点中最も温暖な八丈島では通日 59 日, 九州の 2 地点 (大分と宮崎) では 60 日以降であった。

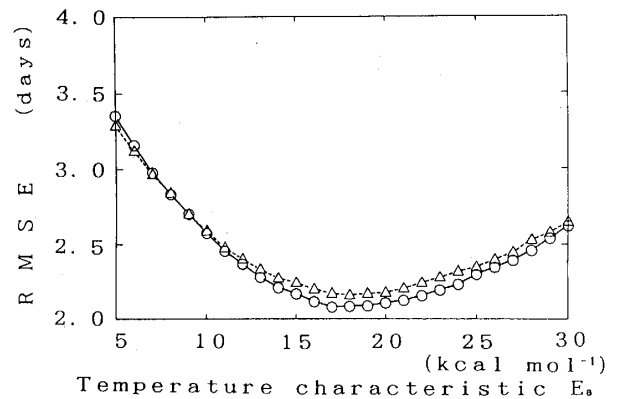


Fig. 10 Relationship between RMSE averaged over 38 sites and E_a for D_s (solid line) and D_r (broken line).

本論文の第 III 章で単回帰分析により決定した起算日の D_r と D_s とを比較すると, 双方が図 9 中の 1:1 の直線上に対応していることが分かった。従って D_s は D_r と同様に, 開花に及ぼす気温の影響の始発時期をほぼ表しているといえる。

次に積算方法を統一する目的で, 気温と温度変換日数との関係を決めるパラメータ E_a を全国的に揃えることを試みた。起算日に D_s を用いた場合に推定誤差を最小にした各地の E_a は, $10\sim 24 \text{ kcal mol}^{-1}$ の広い範囲にわたったが, 実際はどの地点とも, $E_a = 15\sim 25 \text{ kcal mol}^{-1}$ の範囲内で RMSE が互いに $0.3\sim 0.5$ 日の差しかなく, この範囲の E_a ならどれでも

ある程度正確な推定が可能なが示唆された。図10は、38地点で D_s を用いたときの推定誤差の平均を、 E_a 毎に示したものである。38地点の平均誤差は 17 kcal mol^{-1} の場合に極小になった。また、31地点の D_r でのRMSE平均値も同様に、 17 kcal mol^{-1} の場合で極小にかなり近づいた。以上より、 E_a に 17 kcal mol^{-1} を使うことによって、地点毎に平均して精度の高い推定が可能になると同時に、積算方法を全国的にかなり統一できることが分かった。なお前節では、花芽伸長に関する E_a としてアレニウスプロットの傾きから平均で $16.8 \text{ kcal mol}^{-1}$ という値が得られたが、上記のように求めた全国共通の E_a はこれにほぼ一致している。

表4には、起算日に D_s 、 E_a に 17 kcal mol^{-1} を用いたときの各地の推定精度(RMSE)を、また図11には38地点中6地点の推定結果の例を示す。北海道、東北、北陸地方など比較的寒冷な地域では、RMSEが2日以内であり、図の酒田のように推定開花日が実際の開花日の変動にかなり近くなった。酒田では

RMSEが38地点中最小の1.18日で、この25年間に4日以上推定誤差がなかった。しかし、暖地ほど精度は低く、特に八丈島や九州の多くの地点では誤差がかなり大きくなった。八丈島ではRMSEが6.64日と、38地点中最大であった。九州、四国地方のほとんどの地点では、RMSEは2日以上であった。

暖地における大きな誤差の主因としては、休眠打破の遅速の年次間差が考えられる。冬季の自発休眠の解除が十分なほど、サクラの開花促成時における到花日数が少なく済むので⁴⁰⁻⁴²、休眠の解除は適切な低温との遭遇にともなって、次第に進むものと見なせる。こうした過程は暖地ほど全般に遅れ、年によっては D_s の時点でまだ休眠を十分完了していないことも考えられる。そうした場合、 D_s から本格的な花芽発達の再開までにより多くの時間を要し、開花までに要する温度変換日数の積算値が平均より多くなる。暖地では実際に休眠打破の推移の年次間差の影響から積算値が大きく変動し、誤差が増加した

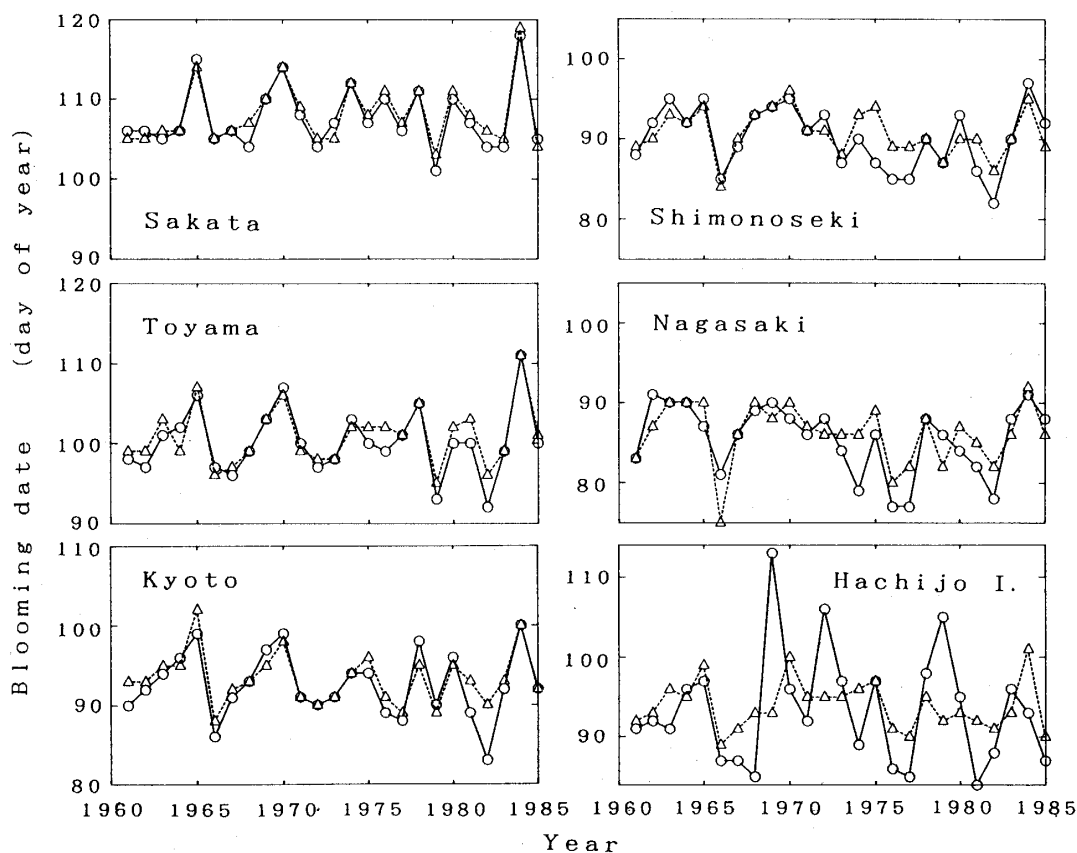


Fig. 11 Secular changes of observed (solid lines) and estimated (broken lines) blooming dates of *P. yedoensis*. Estimation was made by accumulated DTS with starting date D_s and 17 kcal mol^{-1} of E_a .

例が多くみられた。特に八丈島では冬季の気温次第で、開花までの積算値がかなり大きく変動し、推定誤差が顕著になることが分かった。

上記の誤差の原因の他には、推定開花日の全般的な『偏り』による誤差も考えられる。 \overline{DTS}_{25} の厳密な計算のためには、各年の温度変換日数の積算を開花時刻で打ち切る方がよい。しかし、今回の計算方法では、 \overline{DTS}_{25} に実際の開花日1日分の温度変換日数の値をそのまま含めているので、 \overline{DTS}_{25} が過大評価されている可能性があり、推定開花日が全体に遅れたと考えられる。

以上の二つの原因について補正してもなお残る誤差は、おそらく気温の日較差、気温データの地域代表性、あるいは樹齢の違いなど気温以外の要因の各影響によるものと考えられる。

第4節 ま と め

本章では、切り枝を使った開花促成実験による花芽の発達速度の分析を試み、さらに、温度変換日数法を用いて、気候データを使用した統計的手法による開花日の推定を行った。

まず切り枝水挿し法による開花日の促成実験を行い、アレニウスプロットによって花芽の伸長速度を表す温度特性値 E_a の決定を試みた。その結果、この E_a の値は $15 \sim 18 \text{ kcal mol}^{-1}$ (平均 $16.8 \text{ kcal mol}^{-1}$) であると判断された。

続いて、温度変換日数法に基づく開花日の推定統計モデルの作成を試みた。推定に適切と思われた地点毎の起算日 (D_0) は、北海道～東北では通日40日以前、これ以南の各地では通日40～55日の範囲であった。また、気温から温度変換日数へ換算する際に用いる温度特性値 E_a の全国共通の値は 17 kcal mol^{-1} と決定された。この D_0 と 17 kcal mol^{-1} を用いることにより、積算方法がかなり統一された。この E_a の値は切り枝の開花促成における実験値とも一致した。

このときの推定精度は、東北、北陸など寒冷地でRMSEが2日以下、それ以南のほとんどの地点では3日以下とかなり高かった。しかし暖地では、冬季の休眠打破の年次間差に起因するとみられる推定誤差も目立った。また、計算された平均積算値の過大評価が推定開花日の全般的な遅れを招き、誤差を増加させた。モデルの精度向上には、こうした誤差をなくすための補正を行う必要があると考えられる。

第V章 温度変換日数モデルにおける推定誤差の補正

本章では、温度変換日数モデルによる各地の開花日推定精度の改善を目的として、i) 温度変換日数の平均積算値 (\overline{DTS}_{25}) の過大評価が招く誤差、ii) 休眠打破の進み具合の年毎の変動から生じる推定誤差、の二つを減らす試みについて述べる。

第1節 平均積算値修正による精度の改善

前章の各地の推定結果の考察では、温度変換日数の平均積算値 \overline{DTS}_{25} の過大評価によって、推定開花日が全体的に遅れることが誤差増加の一因と考えられた。その理由についてはすでに前章で述べたが、実際に推定開花日と実際の開花日を平均して比較したところ、各地点とも前者が後者に比べ0.5～0.7日程度相対的に遅れていることが分かった。そこで、推定開花日の全体的な遅れによる推定誤差の除去を試みた。

ここでは地点毎に \overline{DTS}_{25} を0.01日ずつ減少させて、推定誤差の変化の様子を検討した。その結果、全国38気象官署のうち35官署でRMSEが減少することが分かった。誤差を最小にするように修正された各地の \overline{DTS}_{25} を使った場合、各地のRMSEを0.1～0.5日程度であるが減少させることができた(図13)。減少した誤差の量は、寒冷地よりも暖地で多くなる傾向があった。 \overline{DTS}_{25} の修正後におけるRMSEは、佐渡の相川で1.00日と最も小さくなり、それ以外でも、日本海側の地点を中心に補正後の推定精度はかなり高くなった。なお、各地点についての一連の \overline{DTS}_{25} の修正後においては、推定開花日と実際の開花日の平均値同士に有意な差がほとんど見られなくなったことが、 t 分布値を使った検定によって確かめられた。

第2節 休眠打破の進み方の年次間差に関する補正

温度変換日数モデルによる各地の推定結果を検討したところ、特に九州の各地や八丈島などの暖地でもかなり大きな推定誤差の現れることが分かった。その理由として、暖地では冬季の休眠打破の遅速の年間の変動が大きく、これが温度変換日数の積算値の年毎の変動を生み、推定誤差を増加させたことが挙げられる。そこで、休眠に対して有効な低温に遭遇した量を定量化できれば、気温データから休眠打破の進み具合による積算値の変動を推定でき、暖地に

Table 5. Conversion of selected temperature to chill-unit (RICHARDSON *et al.*⁶⁷⁾)

Temperature (°C)	Chill-unit contribution
≤ 1.4	0
1.5 - 2.4	0.5
2.5 - 9.1	1.0
9.2 - 12.4	0.5
12.5 - 15.9	0
16.0 - 18.0	-0.5
18.1 ≤	-1.0

おける開花日の推定精度の改善にもつながると考えられる。

休眠打破に有効な低温に遭遇した程度を表す温度指数についてはいくつか提案されている⁶⁵⁻⁶⁸⁾。これらの指数の多くは、有効な低温に遭遇した時間数(チルユニット)の積算値であるが、これがある特定の時期における休眠打破の進み具合の指標になると考えることもできる。ここでは、同じサクラ属(モモ)について提案され、また、計算が比較的容易と思われる RICHARDSON ら⁶⁷⁾のチルユニットを解析に用い、休眠打破の進み方の変動が招く誤差の消去を試みる。

補正方法: チルユニットを用いた補正は、九州、四国地方の各地と八丈島の計9地点について試みた。解析は1961~85年の25年間、温度変換日数の計算方法は前章第3節と同様の方法による。解析に用いたチルユニットは、表5にあるように、階級区分された時間別の気温から換算される。気温が休眠打破にもたらす効果に応じて、この表にあるような5段階の重みづけられた時間数(チルユニット)を積算した値から、それまでに遭遇した低温の量、ひいては休眠打破の相対的な遅速を知ることができる。

本節の最初の解析では、 D_s までのチルユニットの年別の積算値を計算し、温度変換日数の積算値との回帰式を地点毎に求めた。そして、これらの回帰式から温度変換日数の積算値を年毎に計算し、開花日の推定に使用した。ただし、温度変換日数の積算値の過大評価を消去する意味で、ここに用いる回帰式の定数項も誤差を最小にするように修正した。チルユニットの起算日は、夏季からの積算値が最小(負の値)になった日とした。チルユニットの算出に必

要な気温の時間別データの計算には、PARTON & LOGAN⁶⁹⁾の正弦-指数モデルを適用した。このモデルは、日中の気温の推移を正弦曲線、また日の入時刻から翌朝の日の出時刻にかけては日中の曲線から続いた指数曲線に当てはめたものである。1日の気温の推移を表すこの曲線は、当日の日最高-最低気温と、日の出-日の入時刻から求められる。日の出-日の入時刻は齊藤⁷⁰⁾の方法を参考に計算した。

なお、 D_s がチルユニットの終算日として最も適切とは限らない。ここでは次の解析として、温度変換日数の積算値の年毎の変動との間で最も相関の高いチルユニットの積算値をもたらす終算日(D_t)を各地点で見出した。そして、そこで求めたチルユニット積算値を使って、前述と同じ要領で開花日の推定精度の改善を試みた。

結果および考察: まず各地点の D_s までのチルユニット積算値と D_s 以後の温度変換日数積算値との間の相関を調べた。なお八丈島では、チルユニットの積算値が本土では考えられないほど極端に少なくなった場合、開花までの温度変換日数が顕著に多くなるので、特別に二次回帰式も求めた。各地における一次回帰の結果、八丈島で相関が $r = -0.848$ と最も高く、佐賀を除いた各地点である程度の有意性が認められた。そこで開花日の推定に \overline{DTS}_{25} を使う代わりに、 D_s まで積算されたチルユニットによる温度変換日数の推定積算値を用いる補正を行った。精度の向上が最も顕著だった八丈島では6.64日あったRMSEが二次回帰式を使った場合に3.11日まで減少した。また長崎ではRMSEが1日近く、そのほかの地点でも佐賀を除いて0.2~0.8日の誤差の減少を見た(図13)。

ところで花岡ら⁴⁰⁾などは、サクラの開花促成では12月下旬~1月上旬には休眠打破がかなり進み、実用的な促成を開始できるとした。この時点では、休眠打破の年次間差が大きいと思われる。これ以後、休眠打破の遅い年には休眠打破がさらに進み続けるが、逆に早い年にはほぼ休眠を完了していながら、低い気温のために花芽発達が余り進まず、やがて両者の差が縮まり、 D_s 頃にはこの差が最小になると考えられる。

そうすると、休眠打破の推移が相対的に早い年には D_s まで積算されたチルユニットが必要以上に過大評価されることになり、休眠打破の進み方を表す

Table 6. Correlation between the chill-unit accumulations up to D_t and DTS accumulated from starting date D_s . The accuracy of estimation using correction by these relations is also shown.

Station name	D_s	D_t	Mean chill-units	Correlation coefficient	Root mean square error
	(day of year)				(days)
Hachijo I.	59	50	880	-0.876***	3.21
Oita	† 45	13	932	-0.741***	1.63
Nagasaki	45	12	862	-0.747***	1.81
Kumamoto	44	11	834	-0.795***	1.31
Miyazaki	† 45	12	726	-0.646***	2.33
Takamatsu	44	11	1008	-0.719***	1.33
Kochi	49	2	648	-0.578**	1.80
Tokushima	49	8	880	-0.558**	1.74

†: D_s' , the starting date is determined provisionally instead of D_s .

, *: Statistical significance of linear regression at $P < 0.01$ and $P < 0.001$ respectively.

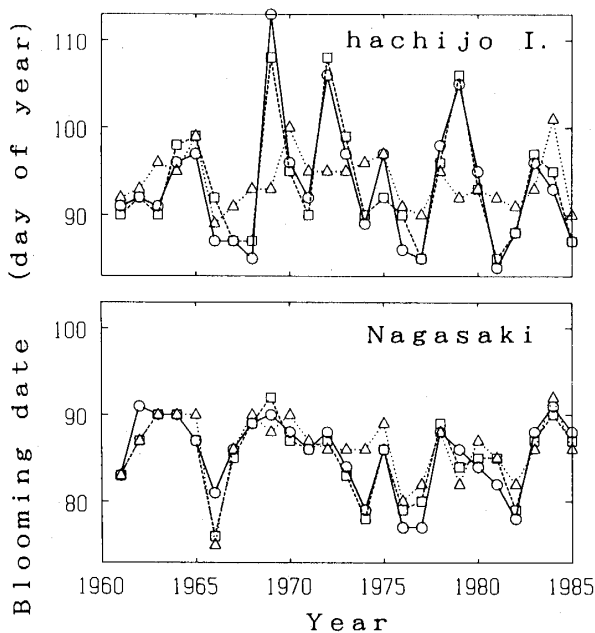


Fig. 12 Secular changes of blooming dates at Hachijo I. and at Nagasaki. Solid lines show observed blooming dates. Broken lines and dotted lines are blooming dates estimated with and without correction using chill-unit accumulated to D_t , respectively.

指標として余り意味をなさない。したがって、休眠打破の進み方をよりよく反映するチルユニットの終算日は D_s より前にあると考えた。そこで温度変換日数積算値の変動との間で最も高い相関を示すチルユニットの終算日 (D_t) を求めた。ここではサクラの

休眠打破がかなり進むと思われる1月初頭から D_s までの範囲を対象に D_t を見出すことにした。

この終算日 D_t やそのときの相関係数を表6に示す。各地の D_t は八丈島で通日50日、九州や四国の各地点で通日2~13日であった。ちなみに佐賀では有意な相関が終始見られず、 D_t は決められなかった。なお、大分と宮崎では D_s が他の地点と比べかなり遅く、両者の間に高い相関は得られなかった。そこで暫定的な温度変換日数の起算日 D_s' を他の九州各地の D_s とほぼ同じ通日45日に設定したところ、終算日 D_t は大分と宮崎でそれぞれ通日13日、12日となった。これらの D_t はサクラの実用的な促成の開始が可能な最も早い時期^(40,41)と一致する。このときの両者の相関は、佐賀を除いた各地が $P < 1\%$ で有意であった。

D_t までのチルユニット積算値を用いた補正の結果、八丈島では推定精度がRMSEで2.32日(二次回帰式を用いた場合)とさらに高くなった。また、佐賀と宮崎を除いたその他の地点ではRMSEが2日以下となった(図13)。これは補正を施さなかった場合の寒冷地における精度と同等である。 D_t までのチルユニットの積算値によって補正した場合の推定結果の例を図12に示す。たとえば八丈島では補正前には一ヶ月近くもある開花日の変動をほとんど捉えられなかったが、この補正後には開花日の変動がかなり正確に再現された。

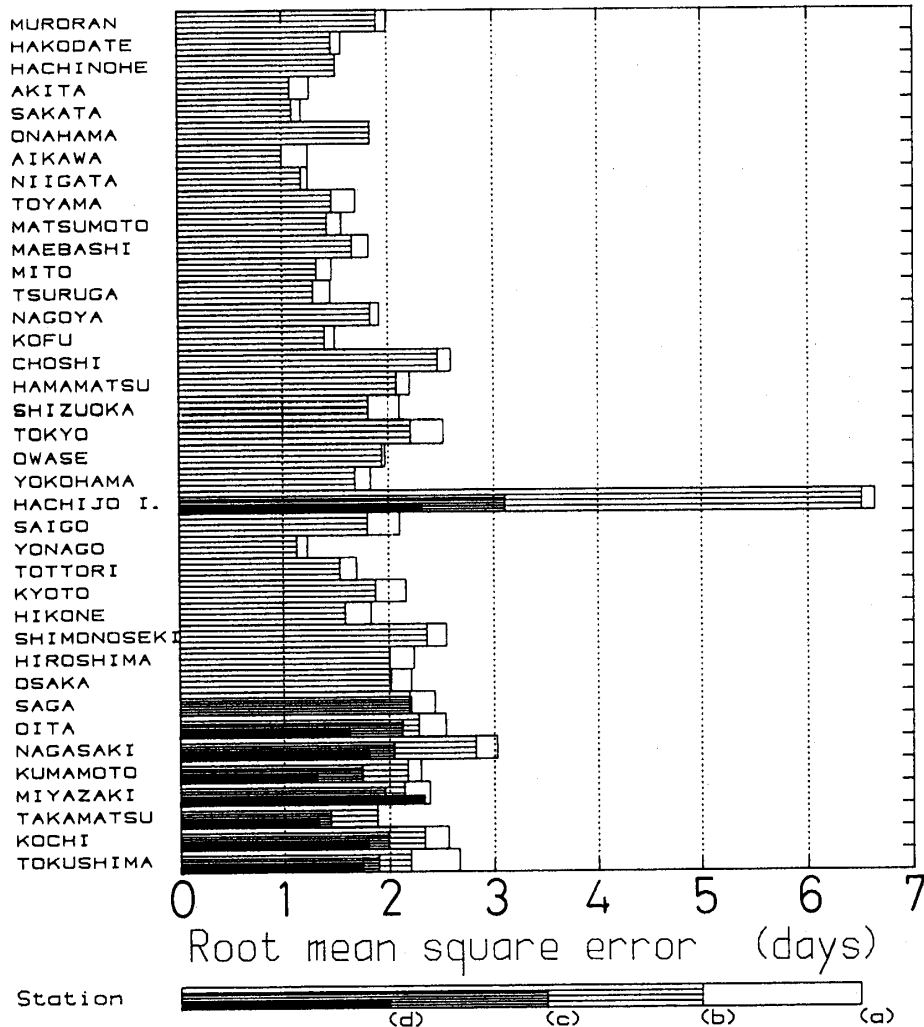


Fig. 13 Accuracy of estimated dates at the 38 sites. (a): not corrected values, (b): estimation using optimized DTS_{25} , (c) and (d): estimations when the variation of DTS accumulations are corrected by chill-units to D_s and D_t respectively.

サクラの花芽については、FELKER & ROBITAILLE⁽⁴²⁾などが示唆したように、休眠が徐々に解除されると共に、花芽の生長が少しずつ進むものと理解できる。起算日 D_s は、低温による休眠打破の進み方と高温による花芽の生長、それぞれの年次間差がどちらも最小になる統計的な平均日であって、決してこの日に花芽が発達し始めるのではないと考えられる。今後、こういった補正を進めるには、サクラの花芽の休眠から発達への『過渡期』にあたると思われる、チルユニットの終算日 D_t から、温度変換日数の起算日 D_s までの期間の扱い方を問題にする必要がある。徐々に解除される休眠と、同時に徐々に再開される花芽形成をどの様にモデルに組み込むかが、今後の検討課題として残った。

第3節 まとめ

温度変換日数法による積算モデルをソメイヨシノの開花日の推定に用いるにあたって、より正確な推定結果を得るための補正方法について検討した。

このモデルでは、推定開花日が実際の開花日より全般的に遅れる傾向があった。これが原因で生じる誤差を消去するために、温度変換日数の平均積算値を幾分減少させた修正値を求めることにした。その値を推定に用いた結果、ほとんどの地点でRMSEを0.1~0.5日程度であるが減少させることができた。

九州などの暖地では、休眠打破の進み方の年次間差が温度変換日数の年変動となって現れ、開花日の推定誤差も増加した。このため、チルユニットを用

いて休眠打破の進み方の年毎の差を把握し、温度変換日数の積算値の年変動を補正することにした。

特に、 D_s 以後の温度変換日数の年毎の変動ととの間の相関が最も高いチルユニット積算値をもたらす終算日 D_f までのチルユニットを補正に用いたところ、八丈島で RMSE が 2.32 日、その他のほとんどの地点では 2 日以内となった。なおこの終算日 D_f は、サクラの開花促成において、実用的な開花が得られる促成開始時期の限界と概ね一致するものであった。

第 VI 章 温度変換日数モデルの簡便化と開花予想

気温を用いた積算モデルによる開花日の推定では、高い精度を得るために通常過去何年分かの日別の気温と開花日のデータを用いて、起算日などの計算上の適切な諸条件を決定している^{14,28,29,55,56}。本論文の IV 章、V 章で述べた積算モデルも同様の理由で過去の開花データを必要とするものである。

本章では、これまでの様な満足できる過去の実際の開花データの無い地点においても、開花日の推定に適用できるようにする目的で、温度変換日数法による開花日推定モデルの簡便化を試みた結果について述べる。開花日の簡便推定法としては、起算日の決定方法が簡便で、なおかつ推定精度ができるだけ高いものが望ましいので、本章ではこれらの条件を満たす推定方法を検討する。ここでは各地で異なる温度変換日数の平均積算値を一定に揃え、これに対応する各地の起算日の一つの重回帰式で求める方法により、開花日の推定を試みる。さらに本章の後半では、この簡便推定法を応用した、開花日の予想方法について検討する。

第 1 節 簡便法による開花日の推定

起算日の決定：前章までで述べてきた温度変換日数モデルでは、各地の適切な起算日 D_s が地点ごとに異なり、同様に 1961~85 年の 25 年間の平均積算値 (\overline{DTS}_{25}) も違っていた。開花日の推定方法の簡便化の目的で、この \overline{DTS}_{25} を全地点で一定の値にするには、各地の D_s に対応する \overline{DTS}_{25} が平均でどの位かを見る必要がある。図 14 にこれまで用いてきた \overline{DTS}_{25} を比較した結果を示す。東東南部の小名浜以南の官署の \overline{DTS}_{25} は 8 日に近い値となる場合が多かった。これは \overline{DTS}_{25} が 8 日となる起算日が D_s のすぐ前後にあることを意味する。これらの地域では、

D_s に近い起算日を使うことで推定精度を高く保てるので、 D_s の代わりに $\overline{DTS}_{25} = 8$ 日となる起算日を使っても、精度に大きな影響はないと考えられた。

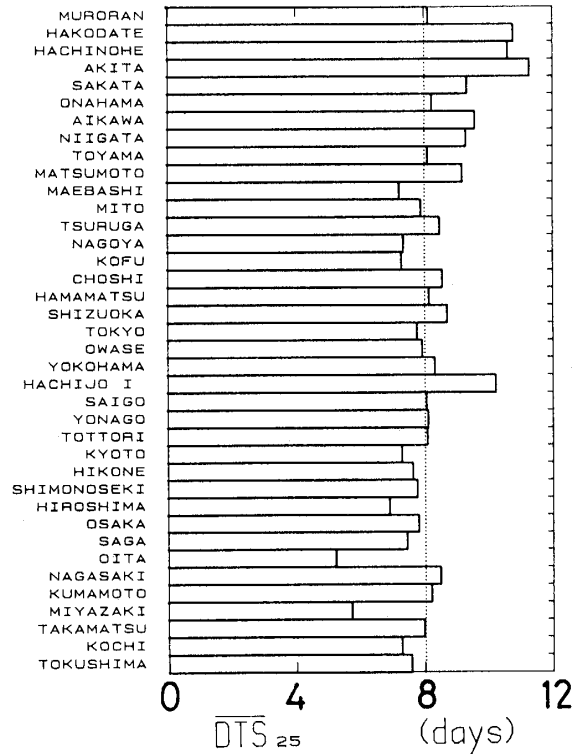


Fig. 14 The values of \overline{DTS}_{25} accumulated from starting dates D_s at each station.

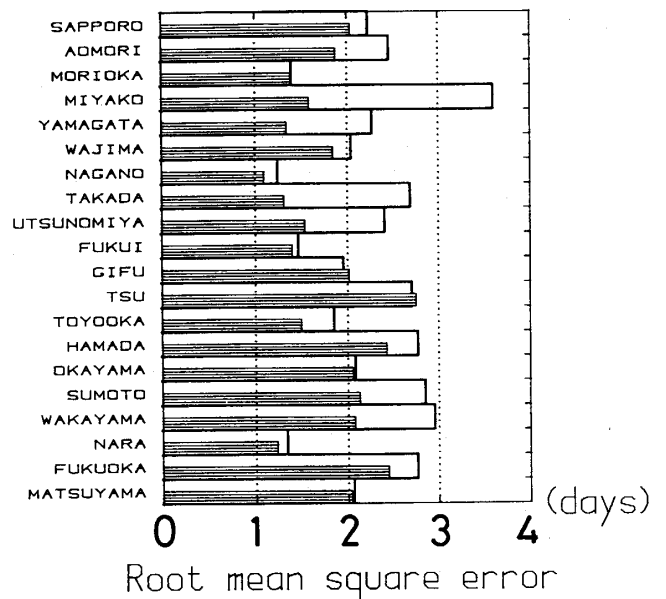


Fig. 15 Accuracy of estimated dates at 20 stations. Hatched bars and whitened bars show the RMSE of estimated using D_s and \overline{DTS}_{25} of each site, and using D_8 and common value of 8 days for DTS accumulations, respectively.

一方、室蘭を除く酒田以北の寒冷地では、 D_8 に対応する \overline{DTS}_{25} が 8 日より幾分多くなった。しかし、寒冷地の場合、起算日の違いによる精度の差が小さく、 D_8 より幾分遅い起算日を使っても推定誤差は余り増加しないと考えられた。以上から、ここでは各地共通の積算値として 8 日を用いることにした。

つぎに、全国共通の平均積算値 8 日に対応する各官署における起算日 (以後 $D_{(8)}$ と記す) の計算方法を検討した。 $D_{(8)}$ の最も早かったのは、前橋や甲府といった関東～中部地方の内陸の地点で、東日本では緯度の高く寒冷な地点ほど遅れる傾向がみられた。緯度に余り差のない西日本では、暖かい地点ほど $D_{(8)}$ が遅れる傾向が強かった。そこで緯度 ψ ($^{\circ}$ N), 海岸からの距離 r (km: 10 km 以下切り捨て), 寒さの指数 CI ($^{\circ}$ C \cdot 月), 温量指数 WI ($^{\circ}$ C \cdot 月) など種々の変数により、全国 38 官署の $D_{(8)}$ の重回帰を試み、以下の式を用いた場合に最も高い相関が得られた。

$$D_{(8)} = 119.80 + 1.600 \psi - 0.066 r + 0.436 (CI) - 2.40 (WI) + 0.0109 (WI)^2 \quad (R = 0.954) \quad (9)$$

(9)式による $D_{(8)}$ の計算値は、関東～中部地方の内陸で最も早く (通日 40 日以前), これより南では休眠完了の相対的遅れの関係から、 $D_{(8)}$ が通日 40～50 日となった。一方、東北や北海道では、 $D_{(8)}$ の計算値が実際よりも遅い傾向にあり、東日本には計算誤差がかなり大きくなった気象官署もある。

簡便法による開花日の推定結果:次に(9)式による $D_{(8)}$ の計算値と全国共通の \overline{DTS}_{25} (8 日) を使った簡便法によって、ソメイヨシノの開花日の推定を実際に試みた。簡便法では共通の平均積算値を求める

のに用いた前述の 38 気象官署以外についても、比較的高い精度が得られることが必要である。ここでは最初に、これまで用いてきた 38 気象官署とは別の全国の 20 気象官署について推定を試みた。

図 15 に、各地の推定誤差 (1961～85 年の 25 年間の RMSE) を示す。福井や岐阜以西の地域では、簡便法による推定精度が上述の方法によるものに比べてそれほど遜色がなく、二つの推定方法の RMSE の差はいずれも 1 日以下であった。従って少なくとも西日本の気象官署については簡便法の実用性が認められた。しかし、宮古や高田といった東日本の一部の官署では、RMSE の顕著な増加が見られた。この大きな RMSE は、これらの地点での $D_{(8)}$ の大きな計算誤差によって生じたものである。各地の推定誤差を検討した結果、 $D_{(8)}$ の計算誤差 1 日分が 0.6 日分の推定開花日の平均的な偏りを招くことが分かった。 $D_{(8)}$ の計算誤差がかなり大きな地点の場合、はじめの数年間の推定開花日の偏りを求め、それから $D_{(8)}$ を補正することによって、推定精度を向上できると思われる。

次に同じく簡便法により、近畿、中国、四国地方に位置するサクラの名所における開花日の推定を試みた(図 16)。名所における開花日のデータには、地元の新聞の『サクラだより』記事の内容を、気温データには開花地点の近隣にあるアメダス観測所による値を使用した。名所についての推定は、原則として 1984～88 年について試みた。

各地の推定結果に注目すると、開花地点とアメダス観測所とが約 4 km 以内と互いにかなり近い場合

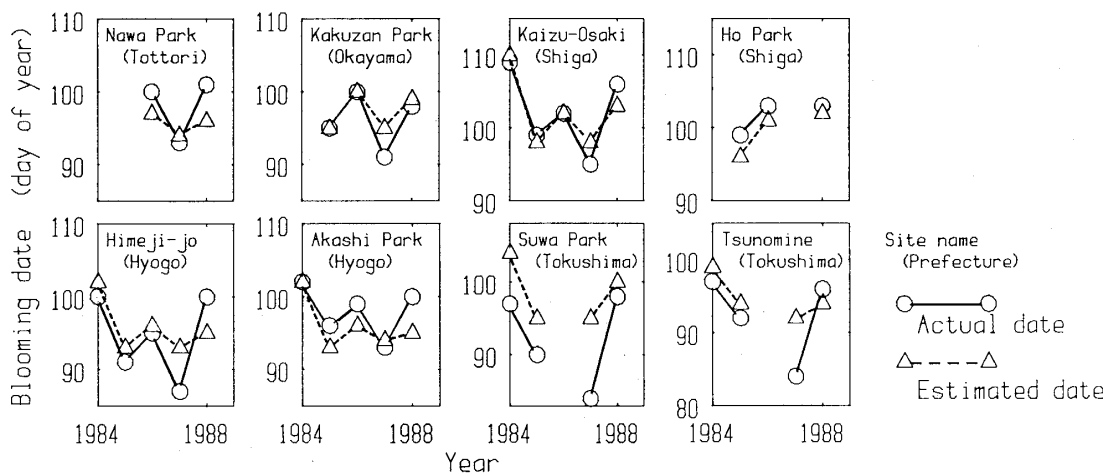


Fig. 16 Estimated dates using common DTS accumulations of 8 days and $D_{(8)}$ at 8 places noted for the cherry blossoms in western area of Japan.

には、岡山県津山市の鶴山公園や兵庫県明石市の明石公園のように RMSE が 3 日以内と推定精度がかなり高くなった。

また双方が 4~5 km 以上離れている場合でも、開花地点とアメダス観測所が共に同じ湖沼の近くにある場合には、海津大崎(滋賀県マキノ町)、石山寺(同大津市)、豊公園(同長浜市)のように RMSE が 3 日以下となった。開花地点とアメダス観測所が共に琵琶湖の近くに位置するこれら 3 例の場合、両地点の標高差が余りなく、また水体の影響で両地点の気温の推移が近いので、推定精度が高くなったと考えられる。

しかし、開花地点とアメダス観測所との距離が大きく離れていたり、標高差がかなりある場合には、推定精度が低下するケースが多かった。たとえば、両地点の標高差が約 100 m ある諏訪公園(徳島県池田町: RMSE=7.05 日)や、観測所から約 6 km 離れた枚方公園(大阪府枚方市: RMSE=8.54 日)、打吹公園(鳥取県倉吉市: RMSE=4.80 日)などで精度の低下が目立った。

以上から西日本では、気象官署やアメダス観測所近くの開花日であれば、過去の累年の開花データがなくても、簡便法によって比較的正確に推定できることが分かった。

第 2 節 開花日の予想

本論文ではこれまで、温度変換日数法による開花日の推定方法とその結果について述べてきた。ところでこうした気温を用いた積算モデルは、開花日の推定の他、開花予想の目的で使われることも多い^{13,55,71)}。開花までのある時点(予想日)に計算された開花予想は、特に果樹の場合には薬剤散布や授粉の時期の決定に役立ち^{55,72)}、予想開花日によって、さらに収穫期や収量のある程度予想できることもある。

ところでこれらの開花予想は、実際の開花に先立って行うので、予想日から開花までの気温の観測値を使えない。従って、積算モデルを開花予想に適用するときには、この期間の気温をどう扱うかが問題となる。

ここでは西日本の 8 地点について、第 1 節で述べた簡便推定法を応用したソメイヨシノの開花予想を試みた結果について述べる。特に、予想日から開花日までの開花直前の気温は開花日の変動に大きく影

響するとみられるので、今回の試みでは予想日以後の気温として、平年値でなく気象台発表の予想気温をモデル計算に適用することにした。

開花日の予想方法:ここでは近畿地方とその周辺の 8 地点における、1974~85 年の 12 年間の開花日の予想を試みた。開花の予想日 P は 3 月 20 日とした。予想は次の手順で行った。まず(9)式で計算した $D_{(9)}$ から予想日の前日 ($P-1$) までについて、日平均気温の実況値 (T_i) により温度変換日数の積算値 DTS_p を下記のように求めた。

$$DTS_p = \sum_{i=D_{(9)}}^{P-1} \exp \{E_a (T_i - T_s) / RT_i T_s\} \quad (10)$$

P 以後には、予想気温を使って積算を継続した。予想気温は各地の日平均気温の平年値 T_i' と毎年の長期予報による予想気温平年偏差の代表値 ΔT_r の和として計算した。そして総積算値が以下のように 8 日を越える初日を毎年の予想開花日 (BD_p') とした。

$$DTS_p + \sum_{i=P}^{BD_p'} \exp \{E_a (T_i' + \Delta T_r - T_s) / RT_s (T_i' + \Delta T_r)\} \geq 8 \quad (11)$$

上式の ΔT_r は、大阪管区気象台発表の 1974~85 年の 1 か月、3 か月予報における予想気温偏差から決めた。気象台による長期予報では、予想気温の平年偏差が 5 段階の階級区分で表される。本研究では、各区分の気温の予想偏差を表 7 のような ΔT_r に代表させることにした。3 月 20~31 日の予想気温の計

Table 7. The classes of temperature deviations in the longrange forecast for Kinki district, and their representative values (ΔT_r) for each class used in this study.

Expressions of classes of temperature deviations from the normals	Representative values (ΔT_r)	
	For late March	For April
	(°C)	(°C)
Much higher	+2.1	+1.6
Somewhat higher	+1.4	+1.0
† As normal or somewhat higher	+0.8	+0.5
As normal	0.0	0.0
† As normal or somewhat lower	-0.8	-0.5
Somewhat lower	-1.4	-1.0
Much lower	-2.1	-1.6

†: Not classified officially, but often used in actual forecast.

算では2月末に発表される1か月予報, 4月については3月20日頃に発表される3ヶ月予報の予想気温偏差を使用した。なお, 比較のため, P 以後の気温として T'_i のみを適用した開花予想も併せて試み, ΔT_r を使用することによる開花の予想精度の変化について検討した。

予想結果および考察: 各地点の12年間の予想精度を表8に示す。長期予報を用いた場合の開花予想精度は全般的にRMSEで2~4日であった。近畿地

Table 8. Accuracy of blooming date predicted on 20 March (1974-85).

Station name	Root mean square error	
	Using $T'_i + \Delta T_r$	Using T'_i only
	(days)	(days)
Toyooka	3.75	3.59
Sumoto	3.44	3.56
Wakayama	3.43	3.66
Nara	2.55	2.65
Okayama	3.14	2.92
Fukui	2.33	2.45
Gifu	3.00	2.96
Tsu	3.87	4.07

方の4地点では, 豊岡を除くと予想気温を使った開花予想の精度の方が, 平年値のみによる場合より高くなった。図17に8地点のうち4地点における開花日の予想結果を示す。予想気温を使った予想開花日は実際の開花日の推移に比較的良くあっており, 年によっては平年値のみによる予想結果より実際の開花日にかなり近づいた(たとえば1981年)。なお, 予想を試みた8地点のうち, 和歌山や洲本などでは, $D_{(8)}$ の計算誤差が出たこともあって, 予想日が遅れる傾向がみられた。

今回の予想では, 予想気温偏差の階級区分を一つの代表値 ΔT_r に置き換えて予想気温を計算したが, これでは幅のある階級区分によって表された予想気温を十分説明できない。現在の長期予報の的中率は6割程度といわれるが, 将来, 階級区分が現在よりも細分化された, 精度のよい予想気温の情報が得られるようになれば, この方法による開花日の予想精度もさらに向上すると考えられる。

第3節 ま と め

本章では温度変換日数モデルを多数地点で開花日の推定に使えるようにする目的で, 積算モデルの簡便化の方法の開発と, それを実際の開花予想に応用

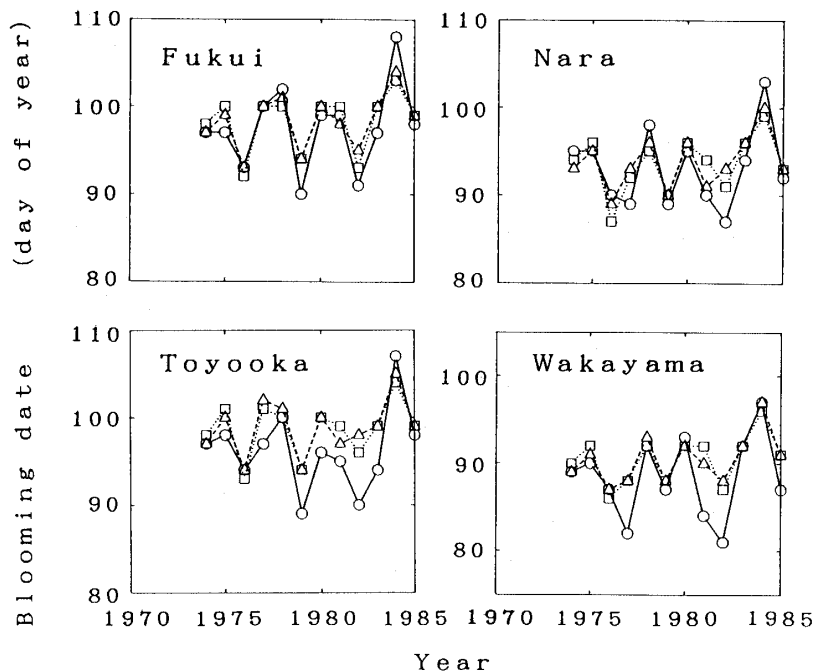


Fig. 17 Results of predictions of blooming at four stations in and around Kinki district. Solid lines show observed blooming dates, broken and dotted lines show blooming dates predicted with and without temperature forecast. Prediction of blooming was made on 20 March.

した結果について検討した。

本章で作成した簡便推定法は、平均積算値を全国共通(8日)とし、これに対応する起算日の $D_{(8)}$ を一つの重回帰式で求めるものである。この方法によって、累年の開花データのない地点でも推定が可能となった。推定精度は、東日本の一部の地点を除いてRMSEが3日以内で、特に西日本では開花地点近くの気温データがある場合にこの推定方法が実用になることが確かめられた。

簡便法を応用した開花日の予想の試みでは、気象台が発表した長期予報による予想気温を使用した。近畿地方とその周辺計8地点について予想を試みた結果、予想精度はRMSEで2~4日程度だが、気温の予報が当たった年には開花日もよく予想されることが示された。

第VII章 気候解析への温度変換日数モデルの応用

これまで述べてきた温度変換日数モデルでは、毎年のソメイヨシノの開花日をかなり高い精度で推定できる。そこでもし、ある温度を実際の気温に加えたり差し引いたりした値を開花日の推定モデルに用いたならば、その際の開花日が比較的正確に求められると考えられる。こうした方法を使い、種々の気温変動を想定した場合の推定開花日を計算することによって、気温の変動に伴う開花日の変化の程度や地域差も概算できるであろう。

本章では、上で述べたような考えに基づき、開花に及ぼす気候の影響の評価に、温度変換日数モデルを応用した二つの例について述べる。第1節では、都市昇温がソメイヨシノの開花日の変化に及ぼしてきた影響について、第2節では、現在懸念されている地球温暖化がソメイヨシノの全国的な開花日分布のパターンに及ぼす影響についての定量的な評価の結果を述べる。これらの解析結果に基づき、温度変換日数モデルを応用することで開花日の変動と分布の両面を関連させた気候の影響評価が可能になるかを検討する。

第1節 都市の昇温の開花日への影響の評価

ソメイヨシノの開花日が都市昇温の影響を受けていることは、たとえば大阪市内における開花日分布がヒートアイランドの存在を示唆したパターン(図3)となったことから明らかといえよう。都市昇温

の植物季節現象に及ぼす影響の評価を試みた例は過去にあるが⁷³⁾、都市昇温による植物季節の早まりがいつ頃現れ始め、どのような推移で今日まで増加してきたかを確かめるには至っていない。

もし、東京や大阪などの都市の気温から、都市効果の影響を取り除いて自然値化した気温を使えば、温度変換日数モデルによって都市効果のない場合の開花日の推移が推定できると考えられる。また、気温の観測値と自然値を使った推定開花日同士の差によって、都市昇温による開花日の早まりが定量化できるであろう。都市では大気・土壤汚染、建物なども開花に影響すると考えられるが、本節では温度変換日数モデルを用いて、都市昇温による開花の早まりの日数の定量化、ならびに早まりの推移の評価の方法を検討する。

解析方法: この解析は東京、京都、大阪の三都市について試みた。解析期間は東京では1900~85年、京都、大阪では1942~85年とした。この期間を通した開花日の推定精度は総じて高く、また推定誤差の推移には系統的な変化傾向は認められなかった。

都市における気象官署の月平均気温の観測値の自然値化(都市効果を差し引いた気温の計算)には、小元・饒谷^{74,75)}の方法を用いた。これによって今回は各都市の2,3,4月の平均気温を自然値化した。ここでは月平均気温の都市効果の年々の値を計算し、日平均気温の観測値から当該の都市効果を差し引いて、日平均気温の自然値を求めた。この気温の自然値を温度変換日数モデルに入力し、開花日を推定した。開花日の推定は第IV章第3節の方法に従い、起算日には各都市の D_s , E_a には 17 kcal mol^{-1} 、また平均積算値には第V章第1節で述べた \overline{DTS}_{25} の修正後の値をそれぞれ用いた。そして各年の気温の自然値による推定開花日と、実際の気温による推定開花日との差を、都市昇温による開花の早まりとした。

結果および考察: 3都市における開花の早まりを議論する前に、気温上昇に伴う開花日の変化の仕方やその地域性を確かめる必要があると思われる。ここでは気温上昇を想定したときの、推定平均開花日の早まり方の特徴やその地域差について検討する。まず、1961~85年の日平均気温の観測値に毎年同じ値の気温を加え、各地の推定開花日の平均値の変化を計算した。図18は、気温の上昇量と平均開花日の早まりとの関係の例を示すものだが、開花の早まり

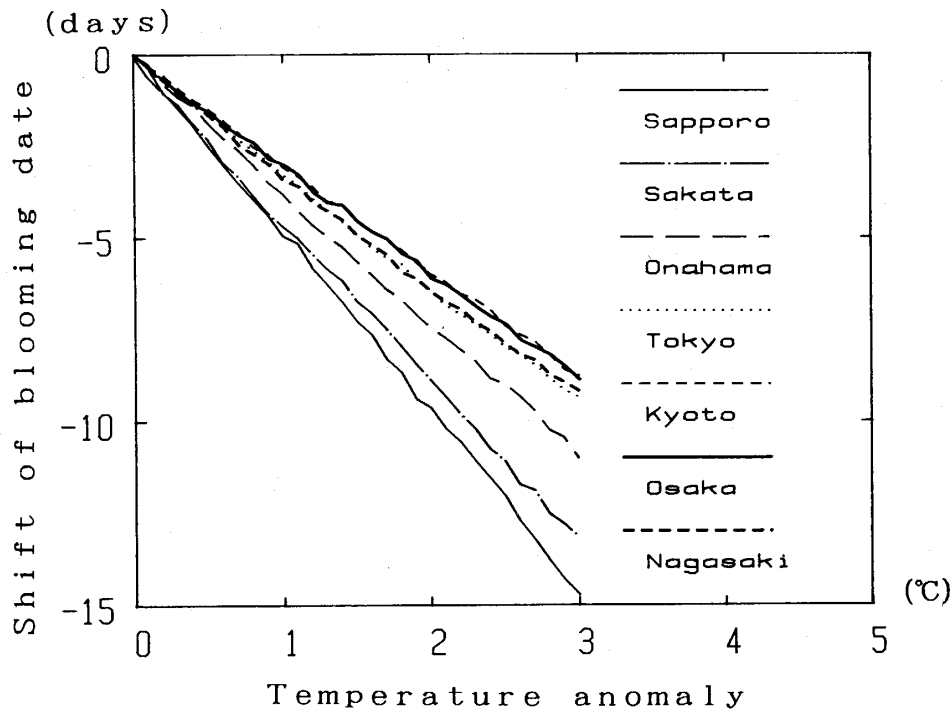


Fig. 18 Relationship between temperature anomaly and shift of blooming dates from the normals at selected cities.

は気温の上昇に伴って各地ともほぼ一定の割合で増加することが分かった。この図によれば、3°Cまでの気温上昇ならば気温上昇量と開花の早まりがほぼ比例し、気温の自然値と観測値による推定開花日同士の差を都市昇温による早まりとして年毎に比較できることが示唆される。

ただし、こうした推定平均開花日の早まりには地域差がみられた。現在の平均開花日の遅い寒冷な地点ほど、気温の上昇に伴う開花の早まりが大きく評価された(図 19)。青森や秋田では早まりが最も大きく、1°Cの上昇につき約6日の早まりが、一方温暖な高知では1°Cの上昇で約3日の早まりが予想された。以上のように、同じ量の都市効果を受けたとしても、出現する開花の早まりは各地で異なることが分かった。

3都市における実際の気温による推定開花日と、気温の自然値による推定開花日の推移を図 20 に、またこれら両者の差、すなわち都市昇温による開花の早まりの推移を図 21 にそれぞれ示す。東京では1920年代半ばから両者に差がみられ、1940~50年代の一時期を除いてこの差が広がる傾向にあった。特に1970年代以後の早まりは大きく、これが9日に達した年もあった。京都でも1940年代にすでに4日前

後の早まりがみられ、1960年代まで増加する傾向があったが、1970年代に入るとこれが止まり、最近ではむしろ減少する傾向さえ見られる。大阪の場合は1960年代までは東京や京都に比べ都市昇温による早まりが極めて少なかったが、1980年代入ると京都の早まりとほぼ同じ日数にまで増加した。

今回の解析の結果から、最近30年間では東京の開花の早まりが0.15日/年、大阪では0.14日/年の割合で増加したことが分かった。また、1981~85年の5年間の平均の早まりは、東京で7.8日、大阪で4.6日、京都で4.8日であった。なお、都市の気温の自然値を使った推定開花日の推移が、都市でない周辺の地点の実際の開花日の推移にほぼ並行していることが確かめられたので、今回の解析によって都市効果のない場合の開花日を概ね正確に推定できたと考えられる。

積算モデルから計算された東京や大阪の開花の早まりはかなり大きなものであった。しかし、開花日の早まりの日数は都市昇温の程度の外に、開花に対する気温の影響度にも左右されると考えられ、早まりの日数やその増加の推移は都市間で単純で比較できない。こうした地域差をより明確に把握するには、さらに多くの都市について詳細な検討が必要であ

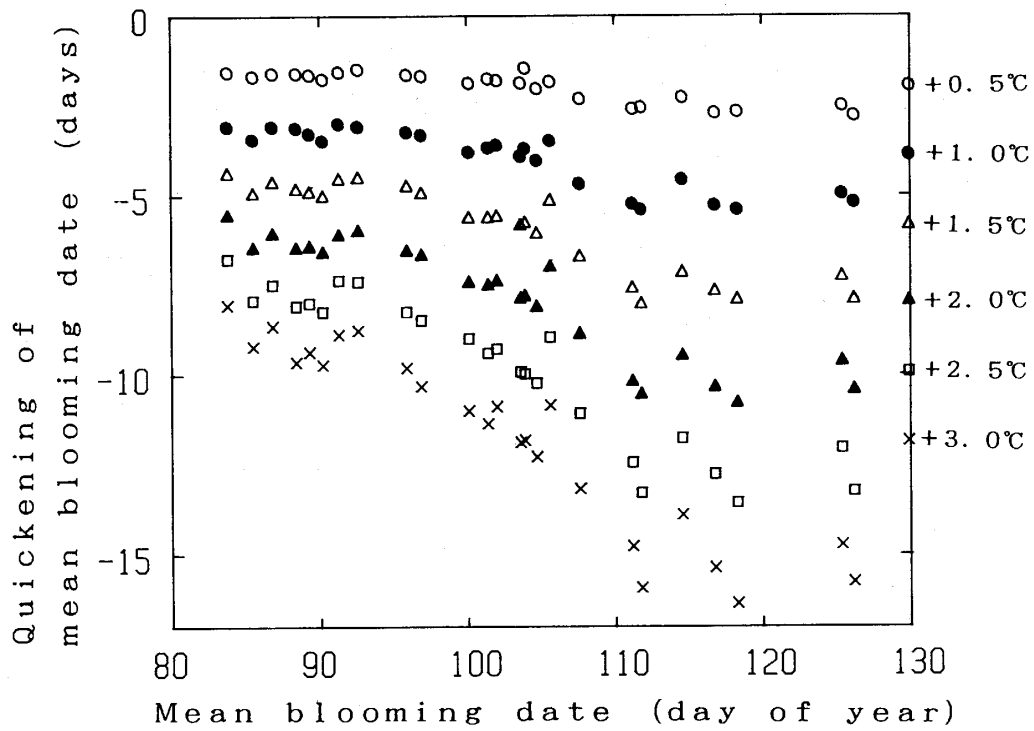


Fig. 19 Showing the existence of regional difference on the relationship between departure from the normal temperature and quickening of mean blooming date. Abscissa is mean blooming date (1961-85). Data are plotted every 0.5°C intervals.

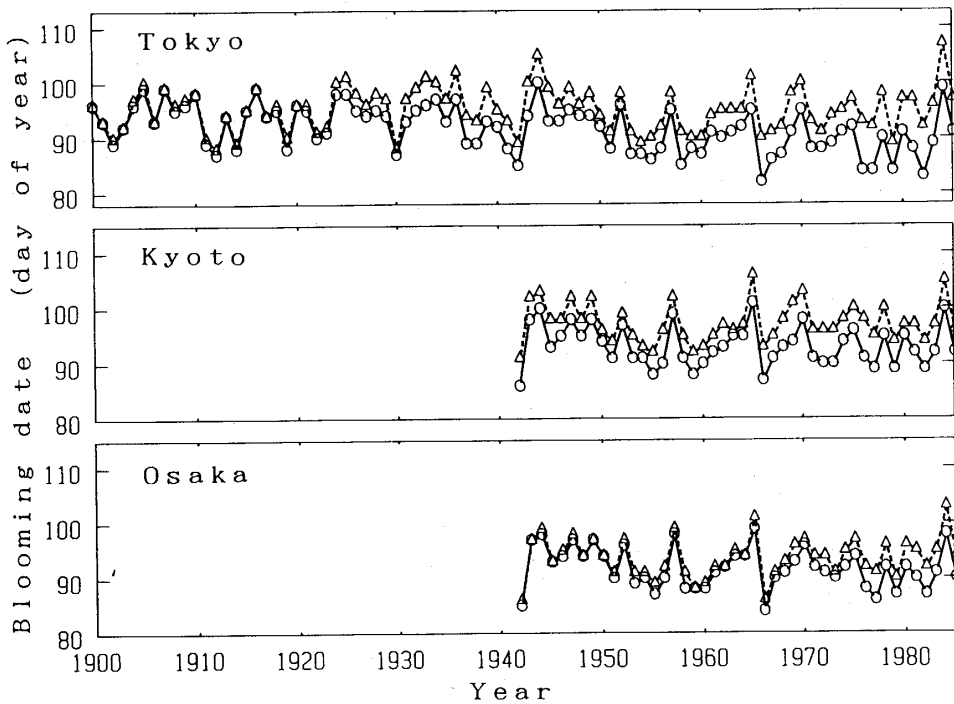


Fig. 20 Comparisons of estimations of blooming date with (broken lines) and without (solid lines) urban warming effect at three large cities in Japan.

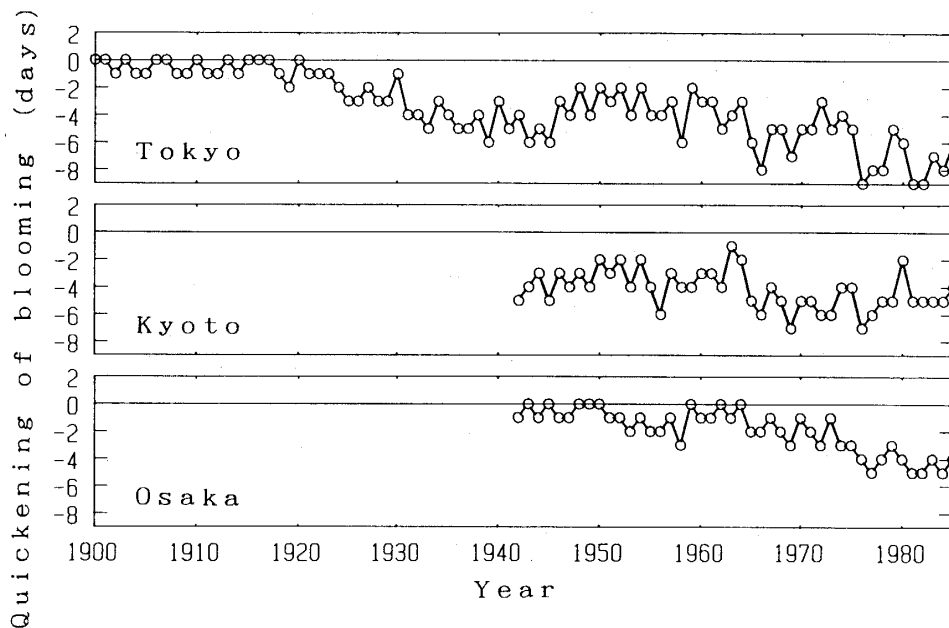


Fig. 21 Quickeings of blooming dates of *P. yedoensis* at three large cities.

る。

第2節 開花日分布に関するシミュレーションの試み

最近、人間活動による地球規模の温暖化が注目されており、たとえばそれが生じた際の植生帯の分布や植物の成育の地域差への影響評価の試みも行われている。こうした温暖化はソメイヨシノの開花日の分布にも大きく影響すると考えられるが、同じ量だけ気温が上昇しても、そのときの開花の早まりには地点差が現れることが第1節で述べた解析結果から予想される。従って、一律の気温上昇を想定した場合でも、開花日分布パターンが現在のものから大きく変化する可能性がある。ここでは全国で一様に1°Cあるいは2°Cの気温上昇を想定し、そのときの地点毎の平均開花日の変化を温度変換日数モデルを使ってシミュレートした結果を示す。そして平均的な開花日分布パターンに及ぼす温暖化の影響について考察を試みる。

解析方法：シミュレーションは国内55地点と韓国3地点について試みた。温度変換日数モデルによる平均開花日の計算には、起算日に D_s 、 E_a に17 kcal mol⁻¹を用いた。韓国3地点の起算日は篠原²⁷⁾によるものを代用した。

この解析では、計算を簡便化するために日平均気温の平年値(T_i')を用いた。解析の手順は以下の通りである。まず D_s から各地の平均開花日 BD_m まで

の温度変換日数の平年積算値(DTS_N)を、地点毎に次のように求めた。

$$DTS_N = \sum_{i=D_s}^{BD_m} \exp \{ E_a (T_i' - T_s) / RT_i' T_s \} \quad (12)$$

次に T_i' が全国で一様に1°Cあるいは2°C上昇したときの推定開花日を計算した。たとえば1°C上昇の場合には、次式を成り立たせる推定平均開花日 $BD_m'_{(+1)}$ を求めた。

$$\sum_{i=D_s}^{BD_m'_{(+1)}} \exp \{ E_a (T_i' + 1 - T_s) / RT_s (T_i' + 1) \} = DTS_N \quad (13)$$

2°C上昇の場合も1°C上昇の場合に準じて $BD_m'_{(+2)}$ を求めた。

休眠打破の遅速が開花時期にも影響すると見られる九州地方などの暖地では、冬季の気温上昇が休眠打破を遅らせて、開花の早まりを抑える可能性がある。そこで、九州、四国と八丈島の各官署では、第V章で扱ったチルユニットが気温上昇によってどの程度減少するかを計算した。そしてその値から第V章で用いた関係式を使って DTS_N を増加させるように補正し、昇温による休眠打破の遅れを考慮することにした。以上の方法によって求めた各地の平均開花日を地図上にプロットし、気温上昇時の開花等日線のパターン変化について考察する。

結果および考察：ここでは2°Cの気温上昇を想定した場合の解析結果について述べる。図22に、現在

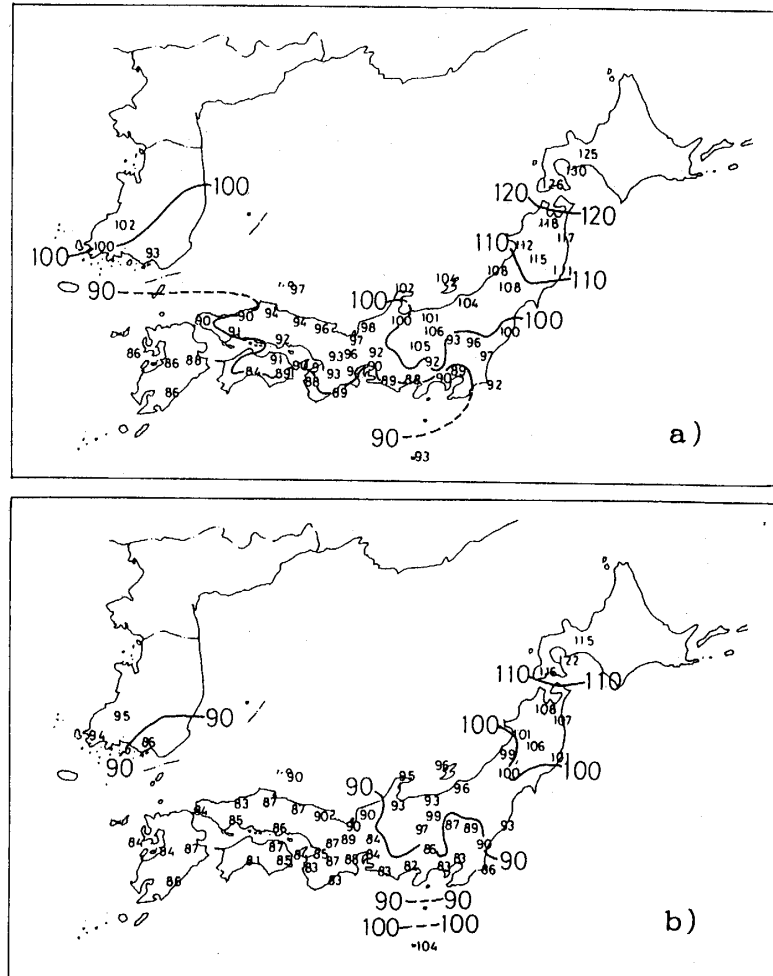


Fig. 22 Estimated distributions of blooming date of *P. yedoensis* at present (a) and for 2°C uniform climatic warming (b).

と 2°Cの上昇想定時の平均開花日の分布を示す。通日 90 日の等日線は、現在ある本州、四国の太平洋の位置より、北陸から関東北部を結ぶ位置まで北上し、また通日 100 日の推定開花等日線も、関東地方北部から一気に東北地方中部にまで北上すると考えられる。

各地の開花日の早まり方には大きな地域差が見られた。北海道～東北北部の多くの官署では現在よりも開花が 10～12 日早くなる結果が得られた。これに対して、東北南部～北信越の各官署では約 8 日、関東～中国地方では約 6 日しか開花日が早くならない。さらに、九州、四国地方といった元々から温暖な地域では、平均の開花日の早まりはかなり減少した。四国の各地点では早まりは総じて 4 日、九州では北・中部で約 2 日、南部はほとんど早くならないと評価された。さらに八丈島では、平均開花日が 10

日以上遅れる結果となったが、現在の生育南限にあたるこの島では、温暖化によって生存自体が不可能になると考えられる。こうした開花日の早まりの地域差のために、気温上昇後には平均開花日の南北差が縮まり、南九州から関東北部までの広い地域で、通日 80～90 日 (3 月下旬) のほぼ 10 日間に一斉に開花すると推測された。

HOPKINS^{76,77)}や中原^{20,22)}は、緯度、経度、海拔高度の三つの要素を含む多項式によって植物季節現象の平均的な分布を比較的良好に表せることを示した。しかし、このような形で表された地理的要素と開花日との関係は、気候変化によって大きく変わり得ることが、今回の解析結果から示唆された。

なお、実際の気候変化では、全国各地で一年を通して気温が一律に上昇するとは考えられない。もし、将来に起こり得る温暖化の程度が地方別・季節別に

予測されることになれば、これに沿った計算の条件を設定して、地点毎の開花日の計算結果を蓄積することにより、さらに正確な開花日分布の予測結果が得られるものと考えられる。

第3節 ま と め

本章では、温度変換日数モデルの応用方法として、開花に対する気候影響の評価を取り上げた。ここではまず、都市昇温がもたらす開花の早まりについて、モデルを用いた定量的評価を試みた。その結果、たとえば東京では1920年代、大阪では1950年代から都市昇温による開花の早まりがみられ、これが年々増加してきたことが分かった。この早まりの増加の割合は、1956～85年の30年間に限れば、東京で0.15日/年、大阪で0.14日/年であった。

次に、全国規模の著しい温暖化を想定し、平均開花日の分布の変化に及ぼす影響の評価を試みた。その結果、寒冷地ほど開花の早まり方が顕著になること、暖地では冬季の休眠打破が温暖化によって遅れ、これが開花の早まりを抑えてしまうこと、また、平均開花日の南北差が現在よりかなり小さな分布パターンに変化し得ることなどが示された。

以上のように温度変換日数モデルは、将来予測される気候変化の過程に沿って、開花期の変化と分布の両面に関連した解析に使用できることが分かった。また、本節では触れなかったが、日記などから得られる植物の開花期を使った古気候の解明にも、この温度変換日数法が使用できるものと考えられる。

第VIII章 結 論

本研究では、わが国の植物季節データの中でも観測地点数・観測年数の両方で最も充実した観測項目であるソメイヨシノの開花日を対象に取り上げて、開花期の変動・分布に関する気候学的な考察を試みた。地点毎に見て開花日の推定精度がかなり高く、また全国的に適用できる計算方法による開花日の推定モデルができれば、各地点の開花日の推定・予想方法はかなり整理され、またこのモデルを開花日の変動・分布の双方に関連した気候学的解析にも応用できると考えた。検討の結果、温度変換日数がこれまで用いられてきた種々の計算法の中で、最も目的にかなうという結論に達したのでこれを採用し、上に述べた条件を備えるような気温による開花日推定

モデルを作り、その応用を試みた。

温度変換日数は、ある日平均気温で気温が植物の生長などに与える効果を、特定の標準温度（本研究では25°C）の下での効果に対する相対値に換算した指数である。本研究で用いた温度変換日数法では、ある起算日以後の温度変換日数の積算値が、開花までに要した平均積算値に達した日とするものである。この方法では、地点毎の起算日と温度変換日数への換算に用いる温度特性値 E_a の二つの適切な値を決める必要がある。

室蘭から宮崎までの全国38気象官署について、数多くの起算日によって開花日の推定を試みた結果、全般的な誤差を最小とする起算日 (D_0) は、東北北部で通日20日以前、山形県や新潟県などで通日20～40日、それ以南では通日40～45日が得られた。また、各地点の積算方法を揃えて推定モデルとしてまとめる目的で、全国共通の適切な温度特性値 E_a を検討した結果、 E_a に 17 kcal mol^{-1} を使うことにより、全体に精度の高い推定結果が得られることが分かった。なお、温室を用いて行ったソメイヨシノの開花促成実験から、花芽発達速度の E_a の値が $15 \sim 18 \text{ kcal mol}^{-1}$ と推定された。これは、気候データを用いた統計解析による前述の E_a の値とほぼ同じである。

起算日に D_0 、 E_a に 17 kcal mol^{-1} を用いたモデルによる開花日の推定精度は、東北、北陸、山陰地方の多くの地点でRMSEが1～2日、その他の地点では全般的に2～3日となった。しかし九州地方の一部や八丈島ではRMSEが3日以上になった。

全国各地の推定結果に注目すると、温度変換日数の平均積算値の過大評価によって生じた誤差、休眠打破の進み方の年次間差により暖地の開花に要する温度変換日数の積算値が大きく変動して生じる誤差のあることが分かった。そこで、前者については地点毎の平均積算値の修正による、また後者についてはチルユニットという温度指数を用いることによる補正をそれぞれ試みた。その結果、全国のほとんどの地点のRMSEを1～2日の範囲まで減少できた。

この温度変換日数モデルを、どの地点でもできるだけ高い推定精度が保たれ、なおかつ平均積算値が全地点で揃えられた状態へ簡便化することを試みた。その結果、全地点の平均積算値を8日と一定に考え、これに対応する起算日を一つの重回帰式に

よって直接計算すれば、過去の開花データのない地点でも 4~5 km 以内の気温データが使える場合に開花日を RMSE が 3 日以内の精度で推定できることが分かった。なお、この簡便推定法は、気象官署ばかりでなく、サクラの名所についても適用可能であった。

こうした開花日の推定モデルを、開花日の変動や分布に対する気候の影響評価へ応用した。まずこのモデルを都市昇温による開花日の早まりの定量化に応用した。都市効果を差し引いた気温を用いて開花日を推定し、実際の気温による推定日と比較した結果、過去 30 年間では東京で 0.15 日/年、大阪で 0.14 日/年の割合で、都市効果による開花の早まりが増加していることが分かった。また、実際より高く想定した気温による各地の推定平均開花日を求め、地球温暖化がもたらす開花日分布の変化の予測を試みた。その結果、北の地点ほど開花日の早まり方が顕著で、平均開花日の南北差はかなり縮まることが予想された。

温度変換日数モデルについては、この他にも開花日の変動・分布に関する気候学的研究に応用できると考えられる。たとえば、日記などに記録されたサクラの開花期による古気候の推定、小地域におけるソメイヨシノの開花日分布を用いた小気候の推定などへの応用が挙げられよう。また、本研究のソメイヨシノの開花日推定方法のモデル化の過程は、他の果樹・花木（ことにバラ科）の開花日計算モデルをまとめる場合の参考にもなり得る。温度変換日数法を用いた開花日推定モデルの体系化によって、この方法の果樹・花卉園芸などへの実用的な応用面を、今後考えてみたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、終始懇切な御指導と御助言を賜った、本学農業気象環境学研究室の小元敬男教授に対し、心から御礼申し上げます。また、有益な御助言を戴いた本学環境調節工学研究室の相賀一郎教授、同緑地計画工学研究室の安部大就教授に深く感謝します。

また、サクラの開花資料の収集に際して御協力頂いた、本学内ならびに学外の多くの方々に対し、謝意を表したいと思います。

使用記号

- A : アレニウスの式中の定数 (頻度因子)
 BD : 開花日 (通日)
 BD_j : j 年における開花日 (通日)
 BD_m : 平均開花日 (通日)
 $BD_{m'(+1)}$: 1°C の気温上昇の際の推定平均開花日 (通日)
 $BD_{m'(+2)}$: 2°C の気温上昇の際の推定平均開花日 (通日)
 BD_p' : 予想開花日 (通日)
 C : アレニウスプロットの回帰式における定数
 CI : 寒さの指数 ($^\circ\text{C} \cdot \text{月}$)
 D : 任意の起算日 (通日)
 D_c : 最小の推定誤差をもたらした起算日と α の組合せの内の起算日 (通日)
 D_f : D_s からの温度変換日数積算値と最も相関のあるチルユニット積算値が得られた終算日 (通日)
 D_r : 単回帰分析から求められた、気温が開花に影響し始める日 (通日)
 D_s : 温度変換日数による推定で最も適切とされた起算日 (E_a 別に求めた RMSE の平均値が最小) (通日)
 $D_{(8)}$: 温度変換日数の平均積算値が約 8 日となる起算日 (通日)
 DD : 有効積算気温 (通日)
 DTS : 温度変換日数の積算値 (日)
 DTS_N : 気温の平年値から計算した温度変換日数の平年積算値 (日)
 DTS_p : 開花の予想日までの温度変換日数積算値 (日)
 \overline{DTS}_{25} : 温度変換日数の 25 年間の平均積算値 (日)
 E_a : 温度特性値 (kcal mol^{-1})
 L : 花芽の長径 (mm)
 P : 開花の予想日 (通日)
 R : モル気体定数 ($1.987 \text{ cal deg}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)
 $T_{i,j}$: j 年の通日 i 日における日平均気温 ($^\circ\text{C}$) (K)
 T_i' : 通日 i 日の平均気温の平年値 ($^\circ\text{C}$) (K)
 T_s : 温度変換日数の標準温度 (K)
 WI : 温量指数 ($^\circ\text{C} \cdot \text{月}$)
 i : 通日
 j : 年
 k : 速度定数 (本論文では day^{-1})

- q : 開花日との間で最も高い相関を与えた気温の平均期間 (日)
- r : 海岸からの距離 (km)
- t_i : T_i の条件である生長変化にかかった時間 (日)
- t_s : 温度変換日数 (日)
- $(t_s)_{i,j}$: j 年 i 日における温度変換日数 (日)
- u : 24時間当たりの花芽の伸長量 (mm day^{-1})
- ΔT_r : 気温の予想年偏差の代表値 ($^{\circ}\text{C}$)
- α : 有効積算気温の基準温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- ψ : 緯度 ($^{\circ}$)

引用文献

- 1) 気象庁 (1975). 気象百年史, 日本気象学会, 485-495.
- 2) 気象庁 (1988). 生物季節観測 30 年報. 気象庁技術報告 第 110 号, 233 p.
- 3) 石田雅生 (1910). 桜ノ開花期ト気温トノ関係. 気象集誌, **29**, 132-138.
- 4) 阪本豹二 (1921). 桜の開花期に就きて. 気象集誌, **40**, 204-207.
- 5) 青木成一・田鹿義雄 (1921). 桜の開花期と気温の関係に就て. 気象集誌, **40**, 93-102.
- 6) 小池 清 (1940). 飛驒, 美濃に於ける桜の開花に就いて. 天気と気候, **7**, 141-144.
- 7) 槌谷 勇 (1941). 桜の開花及満開期日. 天気と気候, **8**, 214-216.
- 8) 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.
- 9) 伏木測候所 (1953). 伏木における桜花期の気象分析. 研究時報, **5**, 147-158.
- 10) 小倉 裕 (1942). 東京市内に於ける染井吉野桜の開花予想. 産気調報, **10**, 127-130.
- 11) 坂井恭正・河原律子 (1952). 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) LINDSEY, A. A. (1963). Accuracy of duration temperature summing and its use for *Prunus serrulata*. *Ecology*, **44**, 149-151.
- 15) 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. 農気東海誌, **45**, 27-29.
- 16) 渡邊正之・菊地常武・金川治三郎 (1928). 大正十五年東京市及び其附近に於ける桜の開花状態に就て. 気象集誌 第二輯, **6**, 185-191.
- 17) 田口龍雄 (1935). 関西の「花の便り」. 海と空, **15**, 216-219.
- 18) 田口龍雄 (1936). 桜花便り. 海と空, **16**, 261-263.
- 19) 中原孫吉・鈴木九十男 (1939). 桜花の季節に就いて. 産気調報, **6**, 252-279.
- 20) 中原孫吉 (1940). 桜の開花期の地理的分布に就いて. 気象集誌 第二輯, **18**, 236-239.
- 21) 小宮書之助 (1943). 東京市内における染井吉野桜の開花状況. 天気と気候, **10**, 212-213.
- 22) 中原孫吉 (1944). 植物季節線の推移状態に就いて. 本邦植物季節の研究 (其の 2). 農業気象, **1**, 153-158.
- 23) 小谷野正喜 (1953). 1952 年の桜 (そめいよしの) の開花. 産気調報, **16**, 133-137.
- 24) 小谷野正喜・坂井恭正・黒岩澄雄 (1954). 桜 (そめいよしの) の開花予想および開花について 1953 年. 産気調報, **17**, 106-111.
- 25) 小谷野正喜 (1955). さくらの開花について 1954 年. 産気調報, **18**, 117-120.
- 26) 篠原久男 (1951). 気温がソメイヨシノの開花に影響する時期. 農業気象, **7**, 19-20.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 小野祐幸・金野隆光・田村良文・鴨田福也・杉野俊彦・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.
- 30) 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.

- 31) 小野祐幸・金野隆光・奥野 隆・浅野聖子 (1988^o). 日本ナシの催芽・開花までの日数への温度の影響. 農業気象, 44, 203-208.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 小元敬男・青野靖之 (1990). 都市昇温のサクラの開花に及ぼす影響について. 農業気象, 46, 123-129.
- 35) 青野靖之・小元敬男 (1990^b). 温度変換日数を用いたサクラの開花日の簡便推定法. 農業気象, 46, 147-151.
- 36) 川口孫治郎(1972). 自然暦, 八坂書房, 172 p.
- 37) 大後美保・鈴木雄次 (1947). 日本生物季節論, 北隆館, 217 p.
- 38) 林 弥栄 (1980). サクラ 100 選, ニューサイエンス社, 128 p.
- 39) 中山矩隆 (1989). サクラの開花予想. 気象, 383 号, 40-42.
- 40) 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.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) BROWN, D. S. (1960). The relation of temperature to the growth of apricot flower buds, *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 75, 138-147.
- 44) 高砂 学 (1957). ソメイヨシノザクラの開花期と落花期に関する小観測(続報). 産気調報, 20 (3), 7-12.
- 45) 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.
- 46) 中央観象台 (1977). 韓国気候表. p. 292.
- 47) 今岡円七 (1987). 瀬戸内海島しょ部での桜開花の遅れ. 日本農業気象学会中国四国支部大会要旨, 28-30.
- 48) 植野隆寿 (1938). 筑波山に於ける染井吉野桜の開花. 天気と気候, 5, 279-282.
- 49) 関口 武・榛葉威彦 (1947). 長野県上伊那郡赤穂町附近の彼岸桜の八分咲期日について, -小地域の季節調査とその気候学的意義-. 地理学評論, 22, 216-224.
- 50) 気象庁(1989). 異常気象レポート'89, 大蔵省印刷局, 107-110.
- 51) 中島健三 (1937). 青島に於ける桜の開花期と気象との関係. 産気調報, 5, 50-53.
- 52) 篠原久男 (1954). 熱海付近の桜とその花期. 産気調報, 18, 47-51.
- 53) BROWN, D. S. (1953). Climate in relation to deciduous fruit production in California IV, The apparent efficiencies of different temperature for the development of apricot fruit. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 80, 114-124.
- 54) LINDSEY, A. A. and NEWMAN, J. E. (1956). Use of official weather data in spring time-temperature analysis of an Indiana phenological record. *Ecology*, 37, 812-823.
- 55) ANSTEY, T. H. (1966). Prediction of full bloom date for apple, pear, cherry, peach, and apricot from air temperature data. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 88, 57-66.
- 56) BOYER, W. D. (1973). Air temperature, heat sums, and pollen shedding phenology of longleaf pine. *Ecology*, 54, 420-426.
- 57) READER, R. J. (1983). Using heatsum models to account for geographic variation in the floral phenology of two ericaceous shrubs. *J. Biogeogr.*, 10, 47-64.
- 58) SISLER, G. P. and OVERHOLSER, E. L. (1943). Influence of climatic conditions on date of full bloom in the Wenatchee valley. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 43, 29-34.
- 59) LIVINGSTON, B. E. and LIVINGSTON, G. J. (1913). Temperature coefficients in plant geography and climatology. *Bot. Gazette*, 56, 349-375.

- 60) PODOL'SKII, A. S. (1958). Novyi metod fenologicheskikh prognozov i agroklimaticheskikh otsenok po teplovomu faktoru. *Doklady Akad. Nauk SSSR (n. s.)*, **121**, 932-935.
- 61) RICKMAN, R. W., RAMIG, R. E. and ALLMARAS, R. R. (1975). Modeling dry matter accumulation in dryland winter wheat. *Agron. J.*, **67**, 283-289.
- 62) 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.
- 63) 金野隆光・杉原 進 (1986). 土壤生物活性への温度影響の指標化と土壤有機物分解への応用. *農環研報*, **1**, 51-68.
- 64) 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.
- 65) WEINBERGER, J. H. (1950). Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **56**, 122-128.
- 66) EREZ, A. and LAVEE, S. (1971). The effect of climatic conditions on dormancy development of peach buds. I. Temperature. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **96**, 711-714.
- 67) 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.
- 68) SHALTOUT, A. D. and UNRATH, C. R. (1983). Rest completion prediction model for 'Starkrimson Delicious' apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **108**, 957-961.
- 69) PARTON, W. J. and LOGAN, J. A. (1981). A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agric. Meteorol.*, **23**, 205-216.
- 70) 斉藤平蔵 (1974). 建築気候, 共立出版, 121-127.
- 71) PERRY, K. B., BLANKENSHIP, S. M. and UNRATH, C. R. (1987). Predicting harvest date of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples using heat unit accumulations. *Agric. For. Meteorol.*, **39**, 81-88.
- 72) HARDING, P. H., COCHRANE, J. and SMISH, L. P. (1976). Forecasting the flowering stages of apple varieties in Kent, England, by the use of meteorological data. *Agric. Meteorol.*, **17**, 49-54.
- 73) LAUSCHER, A. u. F. (1981). Vom Einfluß der Temperature auf die Belaubung der Rosskastanien nach den Beobachtungen in Genf seit 1808. *Wetter Leben*, **33**, 103-112.
- 74) 小元敬男・鱧谷 憲 (1979). 気象官署のデータからの都市気候効果の消去の試み. *農業気象*, **35**, 93-96.
- 75) 小元敬男・鱧谷 憲 (1980). 気象官署のデータからの都市気候効果の消去の試み(2). *農業気象*, **36**, 203-206.
- 76) HOPKINS, A. D. (1918). Periodical events and natural law as guides to agricultural research and practice. *Mon. Wea. Review Suppl.*, **9**, 5-41.
- 77) HOPKINS, A. D. (1924). Notes on the Bioclimatic law. *Nature*, **114**, 608-609.