

# わが国のサクラ（ソメイヨシノ）の開花に対する地球温暖化の影響

誌名	農業気象
ISSN	00218588
著者名	丸岡,知浩 伊藤,久徳
発行元	養賢堂
巻/号	65巻3号
掲載ページ	p. 283-296
発行年月	2009年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# わが国のサクラ (ソメイヨシノ) の開花に対する 地球温暖化の影響

丸岡知浩<sup>†</sup>・伊藤久徳  
(九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻)

Impact of global warming on flowering of cherry trees (*Prunus yedoensis*) in Japan

Tomohiro MARUOKA<sup>†</sup>, and Hisanori ITOH  
(Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University)

## Abstract

This study predicts cherry blossom (*Prunus yedoensis*) flowering in Japan during global warming periods. First, by developing current models for cherry blossom flowering, a model suitable for assessing the climate impact is constructed. This model can predict the dormancy breaking and flowering dates by temperature data alone at any points and for any periods. Applying this model to actual data for 25 years (1979-2003), the average RMSE (root mean squared error) of predicted flowering dates in comparison to actual ones at 36 points in Japan is 2.87 days.

An indicator of the southern border of flowering is also proposed. The flowering model is applied to projected future temperature based on the IPCC A2 scenario. The predictions for the years 2032-2050 and 2082-2100 indicate that flowering dates will become much earlier than at present in cold regions, while later along the coasts in warm regions. It also shows that cherry blossoms will not come out in Tanega-Shima and southern Kyushu, which are currently the southern flowering borders.

**Key words:** Chill-unit, Dormancy breaking, DTS-method, Global warming, *Prunus yedoensis*.

キーワード: 温度変換日数法, 休眠打破, ソメイヨシノ, 地球温暖化, チルユニット

## 1. はじめに

植物の開花や落葉などの時期は、気温に密接に関連している。従ってこれらは地球温暖化の影響を受けやすいと言える。実際、Walther *et al.* (2002) は近年の気温上昇の影響を受けて、植物の開花や落葉などの時期が変化していることを報告した。一般的には温暖化とともに、開花は早くなり、落葉は遅くなる。しかし暖地では冬季に十分な寒さを経なくなるので、休眠打破が遅れ、開花が遅くなることも指摘されている (例えば、Zhang *et al.*, 2007, この場合は正しくは展葉の遅れ)。

日本のサクラも例外ではない。近年の気温上昇傾向を受けて、サクラの開花の時期は早くなっている (Miller-Rushing *et al.*, 2007)。しかし冬季に暖かいと休眠打破が遅れ、開花が遅くなることも知られている。その典型が

2007年であった。この年は暖冬で、全体的には開花日が早まったが、南九州や八丈島などの暖地で極端に開花が遅くなる現象が見られた。特に八丈島では観測史上初めて満開には至らなかった。

今後、温暖化が加速すると、2007年のような今までは違った開花日の変動が観測される可能性がある。また開花の南限が北上して開花しなくなる地域も出てくることが推測できる。このようなことが起これば、それは社会的にも大きな意味を持つことになるだろう。なぜなら、サクラの花は古くから人々の生活に潤いを与え、数多くの文学の対象にされるなど、我々の生活と密接に関係してきたからである。また古来から花王と称せられ、「花」と言えばサクラを指し、さらに慣習上の国花にもなっている。従ってサクラの開花が温暖化でどのように変化するかは十分に研究すべき価値を持っていると言える。

しかしながら、今後の温暖化に伴うサクラの開花の予測に関する研究はほとんどない。著者の知識によると、

2008年12月24日 受付, 2009年6月11日 受理

<sup>†</sup> Corresponding Author

Shimizu *et al.* (2007) が唯一のものである。しかし開花と気温の間に線形関係を仮定しているため、一方的に開花の早くなるモデルとなっている。最も重要な開花の遅れや咲かなくなる状況は想定されていない。

そこで、本研究では、開花の有無も含めた将来のサクラの開花を予測することを目的とする。この目的のために、まず気候変化の影響に適用できるサクラの開花モデルを作成する。その後、この開花モデルを温暖化した際の気温に適用することによって、将来の開花の予測を行う。

ただし本研究では、サクラの開花一般を対象にするのではなく、もっぱらソメイヨシノの開花を対象とする。その理由は3つある。まず第一に、サクラのなかでソメイヨシノは最も一般的・代表的なものであるからである。第二に、地球温暖化の影響を調べることに適した植物であるためである。なぜなら、ソメイヨシノは人工的に接ぎ木で繁殖している品種であるため、すべての木が同じ遺伝子情報を持つ。そのため、同じ条件が整えば開花時期がほぼ同じになると考えられ、単純な開花モデルに当てはめやすいという特性を持っている。第三に、データの的にも、気象庁の開花・満開データが長年に亘って蓄積されており、たいへん扱いやすい対象であるためである。以下でサクラという言葉はすべてソメイヨシノという意味である。

開花モデルを用いたソメイヨシノの開花日の予測は、過去に多数試みられている。Konno and Sugihara (1986) において生体の活性の温度に伴う変化を表す指標である温度変換日数 (the number of days transformed to standard temperature, 以下 DTS) が提案されているが、Omoto and Aono (1989) はこの指標を積算し、ある積算値になった日を開花日とする方法 (DTS 法) を用いて、ソメイヨシノの開花予測を行った。彼らの開花モデルは、予測したい地点の過去の気温データ、開花日データを用い、開花日を RMSE (二乗平均平方根誤差) で 1 ~ 3 日の範囲内で予測することに成功した。

しかし、暖地で特に大きな誤差があった。その理由として、暖地では冬季の休眠打破の年々変動が大きく、そのため予測誤差を大きくしているという可能性が考えられた。休眠打破の時期を推定するモデルの研究は過去に多数行われてきたが (Richardson *et al.*, 1974; Gilreath and Buchanan 1981; Fishman *et al.*, 1987a, 1987b), Aono and Omoto (1990) はそれらの研究のうち、Richardson *et al.* (1974) の導入したチルユニットという指標を使って暖地での休眠打破の変動を捉えることにより、予測誤差を小さくすることに成功した。チルユニットとは休眠打破に向けた進行速度を気温に応じて指標化したもので、秋季から冬季にチルユニットの積算値を計算することによって休眠打破の時期が推定される。彼らは予測

地点の過去 30 年間の気温データでチルユニット積算値を計算し、それぞれの地点ごと、年ごとに DTS 積算値を変化させることによって暖地での誤差を修正している。ただしこれらのモデルでは、地点ごとに近年のデータを用いて最適化されたパラメータを用いるため、他の地点や他の期間へ適用することは不可能である。

Aono and Moriya (2003) は Aono and Omoto (1990) を改良し、全国一律の DTS 積算値や回帰式を用いて開花日を予測する開花モデルを提案した。一方で、この開花モデルでは予測地点ごとの海岸からの距離やその地点周辺の海域の面積などのデータが必要とされる。しかしながらこのようなデータは本来、植物が直接感じ取れるものではない。我々の目指すべき開花モデルは植物が直接感じ取れる要素のみから構成されるべきである。

本研究では、DTS 法に基づきながらも、全国一律のパラメータを用い、予測したい期間の気温のみで休眠打破の時期、開花日までを予測できるように開花モデルを作成する。(我々とは独立に Asakura *et al.*, 2009 が気温のみに依存するサクラの満開モデルを作成している。) また、さらに現在気候において開花しない名瀬と開花の南限である種子島のデータを使用することによって、開花そのものの有無の判定基準を作成する。そしてその開花モデルを将来の予測気温に適用し、将来の開花を予測する。

本論文の構成は以下のようになっている。まず第 2 節では、使用データ、加えて DTS、チルユニットなどの開花モデルに使用したパラメータについて述べる。第 3 節では作成した開花モデルの内容および再現性を、第 4 節では開花モデルを将来の予測気温に適用し、温暖化が進行した場合のソメイヨシノの開花予測結果と考察を述べる。最後の第 5 節にまとめと今後の課題を示す。

## 2. 使用データおよび指標

### 2.1 使用データ

まず開花モデルの作成のため、気象庁生物季節観測累計年値より 1961 ~ 2003 年のソメイヨシノの開花日、および満開日データ、また気象庁年報より同じ期間の時間ごとの気温データを使用した。このうち 1979 ~ 2003 年のデータを開花モデルの作成のために、1961 ~ 1978 年のデータをその検証のために用いた。開花日とは各地の標本木のつぼみが 5 輪以上開花した日、満開日とは標本木の全体のつぼみの 8 割以上が開花した日をそれぞれ指す。気温データについては 1961 ~ 1990 年では 3 時間ごと、1991 ~ 2003 年では 1 時間ごとの気温データである。また、開花日を推定する際には前年の秋からの気温データが必要である。よって、1961 年の開花日・満開日データは使用しなかった。

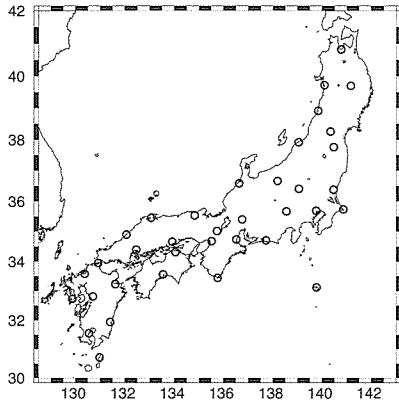


Fig. 1. 36 points used for flowering model making.

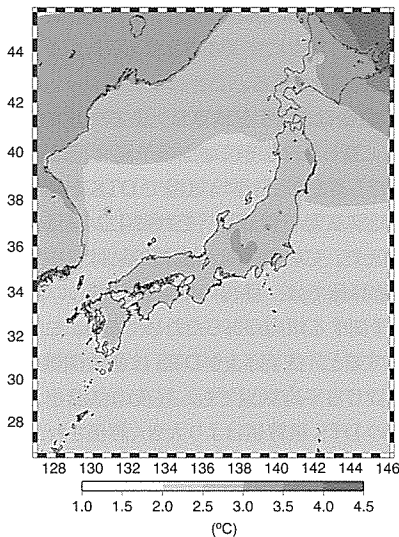


Fig. 2. Change of the average temperature from 1981-2000 to 2081-2100. The unit is  $^{\circ}\text{C}$ .

なお後に示すように、必要な気温データは1時間ごとのデータである。従って1961～1990年に関しては、cubic splineで1時間ごとのデータに補間した。

対象期間において、ソメイヨシノが観測されているのは全国で79地点である。このうち36地点 (Fig. 1 参照) のデータを開花モデル作成のために用いた。これは、開花モデルのパラメータを決める際にかかる多大な計算時間を短くするためである。36地点に間引く際には欠測の有無と (北海道を除いては) 地理的均一性を考慮した。36地点という数は、Aono and Omoto (1990)と同じ地点数であり、代表性は十分にあると考えられる。なお、残りの43地点のデータは検証用として用いた。また、開花の南限を決定するために、現在の南限 (種子島) の南にあ

る名瀬のデータを用いた。

将来の開花の推定においては、気象庁提供による気候統一シナリオ第2版 (2004) による気温データを使用した。日本列島を中心とした格子間隔 20 km で、東西・南北方向ともに 109 格子の気温データである。このデータは全球気候モデル実験の結果のうち、必要な期間を抜き出し、アジア広域で 60 km 格子の地域気候モデル (RCM60)、日本域で 20 km 格子の地域気候モデル (RCM20) の2段階ネスティングで実験を行った結果である。また、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) 地球温暖化第3次評価報告書による SRES 排出シナリオの A2 シナリオに準拠している。A2 シナリオとは、多面的な世界を描いたもので、「基本テーマは独立独行と地域の独自性の保持である。出生率の低下が非常に緩やかなため、世界の人口は増加を続ける」とされる (Nakicenovic *et al.*, 2000)。A2 シナリオに従うと、1990年に 350 ppm だった CO<sub>2</sub> 濃度は、2100年には 860 ppm まで増加する。期間は 2031～2050年、2081～2100年の各20年間で、現在気候との比較のために 1981～2000年の期間も使用した。

Fig. 2 は 2081～2100年と 1981～2000年の20年平均気温の差を示している。これによると対象領域のほとんどで 2.5～3.0 $^{\circ}\text{C}$  上昇していることがわかる。一方、2031～2050年での上昇は多くの領域で 2.0～2.5 $^{\circ}\text{C}$  程度であり、日本海側で 2.5～3.0 $^{\circ}\text{C}$  程度である (図は示さない)。

この気温データには特別気温はなく、1日の平均・最高・最低気温のデータである。このうち、最高・最低気温を用い、Parton and Rogan (1981)の正弦-指数モデルを適用して特別気温データを作成した。このモデルは日中の気温を正弦曲線、夜間の気温を指数曲線にそれぞれ近似したもので、日最高・最低気温、日の出・日の入時刻から毎日の気温の推移を推定するものである。日の出・日の入時刻は Saito (1974)を参考に計算した。また、高地の影響を避けるため、標高 500 m 以上の地点は除いた。計算した全地点は 451 地点である。ただし 20 km 格子のデータなので、島がうまく陸地に対応しない場合があった。実際、八丈島は陸地としてのデータではなかったために対象から外れている。

## 2.2 温度変換日数 (DTS)

温度変換日数 (DTS) は Konno and Sugihara (1986) で提案された。ある一定温度のもとでの1日の植物の生長過程が、特定の標準温度のもとでの条件に変換すると何日分の生長過程に相当するかを表した指標である。ある日の日平均気温が  $T(\text{K})$  であったとき、標準温度  $T_s(\text{K})$  での DTS  $t_s$  は以下の式で表される。

**Table 1.** Relationship between temperature ranges and chill-units.

temperature (°C)	chill-unit
~rg <sub>1</sub>	0.0
rg <sub>1</sub> ~rg <sub>2</sub>	0.5
rg <sub>2</sub> ~9.1	1.0
9.1~12.4	0.5
12.4~15.9	0.0
15.9~18.0	-0.5
18.0~	-1.0

$$t_s = \exp\left(\frac{E_a(T - T_s)}{RTT_s}\right) \quad (1)$$

ここで  $E_a$  は温度特性値 ( $J \text{ mol}^{-1}$ ),  $R$  はモル気体定数 ( $8.314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ) である。標準温度  $T_s$  は Aono and Moriya (2003) に基づき  $15^\circ\text{C}$  とした。

### 2.3 チルユニット

チルユニットは Richardson *et al.* (1974) で提案されたもので、本研究では *Prunus* 属 (モモ) について提案されたものを使用した。休眠打破に対する気温の効果に応じて、Table 1 のような重みを 1 時間ごとに積算して求められる。前年の秋からチルユニットを積算し、休眠打破に有効な低温にどの程度遭遇したかを推定した。本研究では Aono and Omoto (1990) が行ったように、チルユニットの起算日は各年で 9 月 1 日からの積算値が最小となった日とし、年毎に異なる。チルユニット起算日からの積算値がある値になった時点で休眠が完了したと判断することにした。また、Table 1 で  $rg_1$ ,  $rg_2$  ( $rg_1 < rg_2$ ) となっている気温については、Richardson *et al.* (1974) ではそれぞれ  $1.4^\circ\text{C}$ ,  $2.4^\circ\text{C}$  となっていたが、本研究ではパラメータとして調整した値である (3.2 節参照)。

## 3. 開花モデルの作成と再現性

全国一律に同じパラメータを使用し、かつ気温のみで休眠打破の時期、および開花日を予測するモデルを作成した。1979 ~ 2003 年の 25 年間の気温データで開花日を各地点・各年で予想し、実際の開花日との RMSE が最も小さくなるように各パラメータを調節した。また、開花日の変動を捉えきれているかを判断するために、相関係数も参考にした。

開花の有無についての判断は、現在の南限である種子島と南限のすぐ南にある名瀬とのチルユニット積算値を比較して行った。チルユニット積算値を見ることで、休眠打破が正常に行われているか判断できると考えた。

### 3.1 開花日の推定

Sugiura and Honjo (1997) の行ったように、まず各地

点・各年において気温の推移のみで休眠打破の時期を推定した。前年のチルユニット起算日からチルユニットを積算し、チルユニット積算値が  $C_1$  に達した日を DTS 第一起算日、 $C_2$  に達した日を DTS 第二起算日と定義した ( $C_1 < C_2$ )。DTS 第一起算日から DTS 第二起算日までの期間を半休眠打破期、DTS 第二起算日以降を完全休眠打破期とした。このように DTS 起算日を 2 段階にした理由は、1 段階にすると八丈島や種子島などの暖地で RMSE が極端に大きくなったからである。そもそも暖地では年ごとの開花日の変動が寒冷地に比べて非常に大きい。それは暖地では冬季の気温が高く推移し、休眠打破が円滑に行われていないことが原因として挙げられる。よって休眠打破が完全ではない時期、半休眠打破の時期を設けることで、暖地での早い時期からの生長を捉えることができると考えた。実際的にも突然ある日に休眠打破が完了するわけではなく、徐々に完了すると考えられ、それをモデル化していると見なされる。

休眠打破後は DTS を積算し、ある一定の DTS 積算値  $DTS_{cr}$  に達した日をその地点の予測開花日とすることにした。ただしここでも日平均気温で DTS を積算するのではなく、特別気温で積算し、それに  $1/24$  をかけるという工夫を加えた。この理由は、直接的には日平均気温による DTS 積算値では、昼夜の気温差が激しい内陸部で開花を遅く予測する傾向があったためである。これを特別気温で積算すると、式 (1) より DTS は指数関数で求められるので、同じ日平均気温でも、昼夜の気温差が激しいほうが 1 日の DTS 積算値はより大きく評価され、開花の遅れが是正されることになる。植物は 1 日より短い時間スケールの気温に感応していると考えられるので、より現実に近いモデルであると考えられる。

半休眠打破期、完全休眠打破期における DTS の積算はそれぞれ以下のように行った。まず半休眠打破期においては、特別気温が  $T_1$  以上となった時間のみ、そのときのチルユニット積算値に対応した重み  $w$  をつけた DTS を積算した。このことから、冬季の特別気温が  $T_1$  以上となることが稀である地域では、この期間に DTS が積算されることはほとんどない。また、チルユニット積算値に応じた重み  $w$  は、以下の式で表される。

$$w = 2\left(\frac{ch - C_1}{C_2 - C_1}\right) - \left(\frac{ch - C_1}{C_2 - C_1}\right)^2 \quad (2)$$

ここで  $ch$  はその時間のチルユニット積算値である。この式により、チルユニット積算値が  $C_1$  のときを 0,  $C_2$  のときを 1 とし、その間を 2 次式で補間した。チルユニット積算値が  $C_2$  に達して完全休眠打破となった期間については、特別気温に関係なく DTS を積算していくこととした。

DTSを積算し、その後DTS積算値が予測開花日に対応するDTS積算値 $DTS_{cr}$ となった日をその地点、その年の予想開花日とした。南限である種子島や八丈島では、完全休眠打破に達する前にDTS積算値が $DTS_{cr}$ に達することが普通であった。

### 3.2 開花モデルのパラメータとその決定

本開花モデルの調整パラメータはTable 2の通りである。これらの値の決定は以下のように行った。まず大ざっぱな値を過去の研究や、予備的計算、論理的考察に基づいて定め、次にその前後のいくつかの値を総当たりで計算し、RMSE全国平均が最も小さくなるように決定した。計算に用いられた各パラメータのスイープ範囲と刻み幅が同じくTable 2に示されている。

これらの値のおおよその根拠は以下の通りである。まず $rg_1$ 、 $rg_2$ であるが、それらはRichardson *et al.* (1974)ではそれぞれ1.4℃、2.4℃となっていた。そのままの値でチルユニットを積算したところ、寒冷地、特に夜間の気温が平地に比べて低くなる内陸ではなかなか積算されず、結果的に開花日が遅くなる傾向にあった。そのため、寒冷地の低い気温でもチルユニットが積算されるように気温範囲を低くして調節を行った。そうすることで寒冷地（特に内陸）での開花日の過大評価を修正できると考えた。実際的にもニホンナシにおいては、Sugiura and Honjo (1997)、Sugiura *et al.* (2003)によって、0℃までは6℃とほぼ同程度の休眠打破に対する有効性があり、さらに-6℃までは小さいながらも有効性があるとされている。本

研究の設定はこれらと整合的であると言えるかもしれない。なおAsakura *et al.* (2009)のモデルも氷点下での休眠打破の有効性を盛り込んだモデルである。

$C_1$ 、 $T_1$ については、暖地での誤差修正のために設けたものである。寒冷地では反映せず、暖地でのみ有効であるように調節した。ただ参考になるような既往の研究はないので、なるべく広い範囲でスイープを行った。なお、 $T_1$ はチルユニットとDTSがともに積算されるのは適当でないと考えたため、下限を12.5℃としている。 $C_2$ はAono and Moriya (2003)でのDTS起算日と本研究でのDTS第二起算日とが各地で同等になるようにした。 $E_a$ はOmoto and Aono (1989)、 $DTS_{cr}$ はAono and Moriya (2003)での値を参考にして調節した。

このような過程を経て各パラメータを決定した。その最終的な値もTable 2に示されている。なおこれらのうちスイープ範囲の端の値が2つある( $C_1$ と $rg_2$ )。これらに関しては、さらに範囲を広げることで、よりRMSE平均値が小さくなる可能性がある。ただ論理的に考えて $C_1$ がゼロであってはおかしく、また $rg_2$ はSugiura and Honjo (1997)やSugiura *et al.* (2003)の結果からゼロより小さくするのは問題があると考えたため、それ以上の範囲での計算は行わなかった。さらに $rg_1$ は-8℃より小さくしても結果はまったく同じである。なぜならすべての地点で、これより低い気温が観測される前に $C_1$ 、 $C_2$ に達するか、またはそもそもこれより低い気温は観測されないからである。

実はTable 2には現れていないもう一つの重要なパラ

**Table 2.** Adjusted parameters and their most optimal values. They are determined so that the average of the RMSEs at the 36 points takes the minimum, under the prescribed parameter sweep ranges and increments.

parameter	description			
$rg_1$	one critical value of temperature range of chill-unit (see Table 1)			
$rg_2$	one critical value of temperature range of chill-unit (see Table 1)			
$C_1$	accumulated chill-unit to decide the first initial date of DTS			
$C_2$	accumulated chill-unit to decide the second initial date of DTS			
$E_a$	temperature characteristic value of DTS			
$T_1$	lower bound of temperature above which DTS is accumulated after the partial dormancy breaking			
$DTS_{cr}$	accumulated DTS value at forecast flowering date			
parameter	unit	parameter sweep range	increment	optimal value
$rg_1$	℃	-10.0~0.0	1.0	-8.0
$rg_2$	℃	0.0~2.4	0.4	0.0
$C_1$		50~600	50	50
$C_2$		1000~1600	50	1300
$E_a$	J mol <sup>-1</sup>	70~94	2	90
$T_1$	℃	12.5~17.0	0.5	13.5
$DTS_{cr}$	day	22.0~27.0	0.5	24.5

メータがある。それは、DTS 第一起算日を制限するパラメータである。以下、このパラメータについて議論するが、それを  $ST1$  と表現することにする。

まず  $ST1$  の必要性について述べる。DTS 第一起算日を単純に  $C_1$  を越えた日にすると、その直後には寒冷地でもしばしば  $T_1$  を越えることがある。すなわち DTS が蓄積される。しかししばらくすると  $T_1$  を越えることはなくなり(つまり DTS はまったく蓄積されず)、春先になって(ないしは DTS 第二起算日になって)再び DTS が蓄積されることになる。これはたいへん不自然で、現実には起こっているとは考えにくいことである。従って秋から初冬にかけては DTS は蓄積されないように設定し、DTS の蓄積は開花までほぼ連続的に起こるようにするのが妥当であると考えられる。これが  $ST1$  の必要性である。

しかし実際にどのように設定するかは難しい。多くの場所では最寒期に設定するのが合理的であろう。しかし種子島や八丈島などでは  $T_1$  を越えることはどの時期であろうとごく普通なので、このような場所では設定しないほうが良いと考えられる。そこで本研究では、妥協的ではあるが、どの地点でも 1 月 1 日に設定することとした(当然、1 月 1 日にチルユニット積算値が  $C_1$  を越えていない場合は、その後の越えた日が DTS 第一起算日である)。他のパラメータを固定して、 $ST1$  のみをスイープしても結果が大きく変わることはないので、この設定で大きな問題はないと考えられる。なおこのスイープで平均 RMSE が最も小さくなるのは、 $ST1 = 1$  月 18 日であり(念のために述べると、寒冷地ではすでに DTS 第二起算日が過ぎているので、この設定とは無関係である)、平均 RMSE における 1 月 1 日との差は 0.12 日である。しかしこれは種子島や八丈島での RMSE の増加と引き換えにした設定であり、必ずしも望ましいとは言えないであろう。 $ST1$  については、最

後の今後の課題のところでもさらに議論したい。

### 3.3 開花モデルの再現性

36 地点の RMSE を Fig. 3 に、再現した 1979 ~ 2003 年平均の開花日を Fig. 4 にそれぞれ示す。Fig. 4 の右図を見ると、全体的には開花の変動を捉えきれている。実際、RMSE 全国平均は 2.87 日、実際の開花日と予想開花日との相関係数は 0.90 となった。南九州(鹿児島、宮崎)と八丈島、種子島以外の地域ではすべて RMSE が 4 日以下で、かつそのほとんどの地域で RMSE が 3 日を下回っていた。相関係数もほとんどが 0.9 を越えていた。

過去の研究と比べてみても、あまり遜色のない結果であると言える。過去の研究では種子島と八丈島の扱いがバラバラなので、それを除いて比較するのが妥当と考えられる。そうすると本研究の平均 RMSE は 2.52 日となる。過去の研究では平均 RMSE が明示的に述べられていないが、Aono and Omoto (1990) では 2 日弱、Aono and Moriya (2003) のモデル B (全国一律のパラメータで、休眠解除過程を考慮していないモデル) では 2 日強と推測される。地点や期間の違いはあるが、気温のみによるモデルとしては十分な結果であろう。

ただ個別に見ると、南九州では早く、八丈島や種子島では遅く評価している。RMSE が八丈島では 6.76 日、種子島では 10.91 日と特に悪くなった。相関係数を見ても八丈島では 0.71、種子島では 0.46 となり、南限付近では精度が悪いことがわかる。これらの地点では DTS 起算日を 2 段階にしたことによって改善はされたが、まだ十分な精度には達していない。Aono and Moriya (2003) でも南限付近の RMSE が極端に悪い結果になっており、この地域の開花の変動を捉えることにさらなる課題が残った。

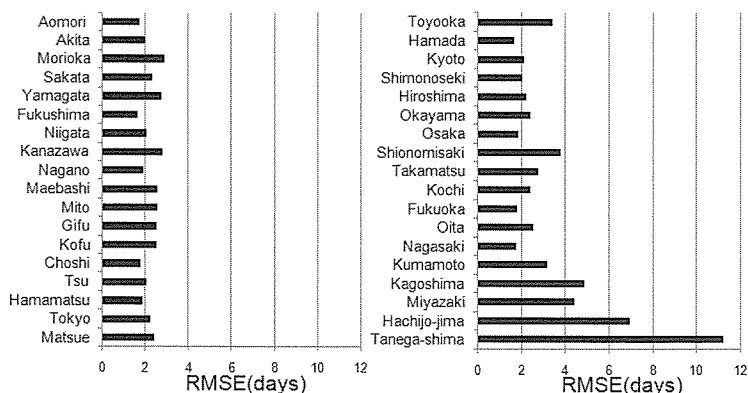


Fig. 3. RMSE of the flowering date at the 36 points. The abscissa shows RMSE (unit: day) while the ordinate indicates the point name.

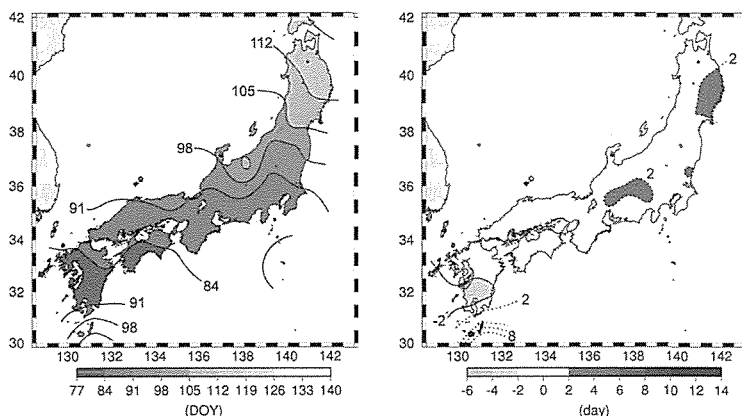


Fig. 4. Flowering date of the average for 25 years (1979-2003) reproduced by our flowering model. The left panel shows the forecast flowering date, represented by the day counted from January 1 of each year (day of year, hereafter, referred to as DOY). The right panel illustrates the difference from observations. The light (dark) shade indicates that forecast flowering dates are earlier (later) than observations.

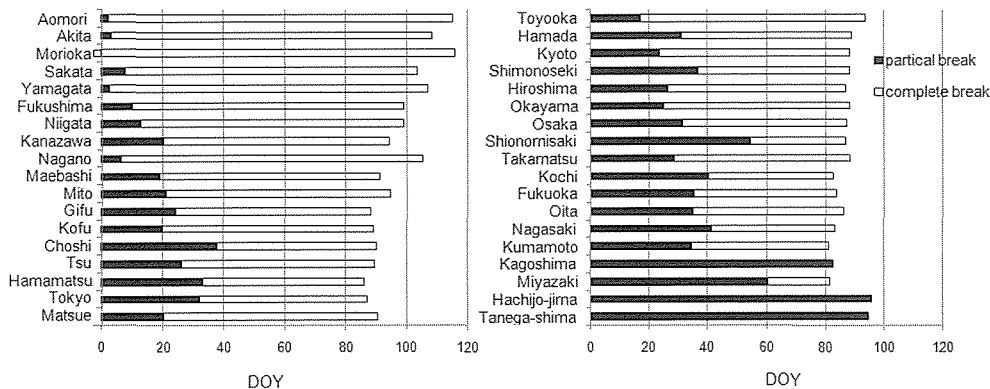


Fig. 5. Average for 25 years (1979-2003) of the partial dormancy breaking period (black), the complete dormancy breaking period (white), and the forecast flowering date (full length) at the 36 points. The points where the complete dormancy breaking period is negative show that the second DTS initial date is before January 1, and the DTS accumulation has started at that day. The abscissa shows DOY, while the ordinate indicates the point name.

Fig. 5 は各地の半休眠打破期・休眠打破期の25年平均を示している。種子島以外ではDTS第一起算日はすべて年明けの前になったため、これらの地点ではDTS第一起算日は通日1日となっている。DTS第二起算日は暖地以外のほとんどの地点では年明けの前から通日40日程度以内に収まった。これらはAono and Moriya (2003) や Omoto and Aono (1989) のDTS起算日よりやや早い、大きな違いはない。また、種子島と八丈島では半休眠打破期だけでDTS積算値が $DTS_{cr}$ に達した年が一般的だったため、25年平均では半休眠打破期しか反映しない地点であると言える。

この開花モデルの妥当性を検証するため、2つの計算を行った。まず空間的な普遍性を検証するため、モデル作成に用いた36地点以外の43地点の1979～2003年のデータに開花モデルを適用した。ただし、そのうち7地点で欠測があったため、実際に計算に用いたのはその7地点を除いた36地点である。結果は平均RMSEが2.83日、相関係数は0.92となった。よって、空間的な普遍性は十分にあると考えられる。第二に時間的な普遍性を検証するため、モデル作成に用いた36地点における1962～1978年の17年間のデータに適用した。ただし、これまでの36地点のうち、潮岬と宮崎の数年で欠測があっ



たため、これらを除く34地点で計算した。その結果、平均RMSEは3.15日、相関係数は0.85となった。よって、やや精度が悪くなるものの時間的な普遍性も十分であり、期間を変えても適用できると考えられる。これらの結果により、この開花モデルを将来の開花予測に採用することとした。ただし、南限付近の精度が悪いために、この地域では注意して考察する必要がある。

### 3.4 開花状況の推定

ここで言う開花状況とは開花と満開の有無のことである。開花状況の判定は36地点と、現在の南限の南にある名瀬とを比較して行った。種子島に限ってみると、この期間では1990年代から2003年にかけて6年、満開にならなかった年があり、現在の種子島を開花・満開の境目の地域と定めることにした。すなわち開花状況の判定では、A) 通常どおり開花し、やがて満開となる地点、B) 開花しても、年によっては満開しない地点、C) 開花しない地点の3種類に分類することにした。A)は現在の鹿児島島以北、B)は現在の種子島、C)は現在の名瀬と同様の開花状況と定める。

本研究では、チルユニット積算値を開花状況の推定に用いた。その理由としては、チルユニット積算値は秋季から冬季、すなわち休眠打破に有効と考えられる時期の気温を反映したものであるため、休眠打破が正常に行われているかを判定することにも有効と考えられるからである。そこで36地点と名瀬において、通日70日までのチルユニット積算値を1979～2003年の各年で計算した。その結果、現在のA)の地点(鹿児島島以北の地点)ではチルユニット積算値は1400～2500程度であるが、B)の地

点である種子島は549.3、C)の地点である名瀬は-262.0と負の値となった。

Fig. 6は種子島と名瀬の各年のチルユニット積算値を比較しているもので、三角形は種子島において満開にならなかった年を示している。種子島で満開にならなかった年については、チルユニット積算値は低い値になっていることがわかる。すなわち、満開にならない年は休眠打破に影響すると考えられる時期の気温が高いことを示唆している。ただし、チルユニット積算値がある値以下になると満開しないという明確な境界は見つけることはできない。また、名瀬のチルユニット積算値を見てみると、おおむね負の値で推移していることがわかる。名瀬では基本的に開花する条件にないということなので、チルユニット積算値が負となった年は開花しないと考えられるかもしれない。しかし、種子島との各年のチルユニット積算値と比べてみても、ある値以下になると開花しないという明確な境界は、満開にならない年と同様に見つけ難い。

これらの理由により、気候の変化を見る場合にはA)、B)、C)を年ごとに分類するのではなく、地点ごとにチルユニット積算値を期間で平均して判定するほうが適切であると考えられる。判定に用いるのは、毎年満開になる地点で最もチルユニット積算値が小さい八丈島、そして種子島と名瀬の通日70日までのチルユニット積算値である。八丈島は毎年満開になる地点としたが、実際には2007年は満開になっていない。しかし、本研究では2003年までのデータを使用しているため、ここでは満開になる地点としても問題はない。八丈島、種子島、名瀬のそれぞれの値の間に境界があると考えられるため、本研究ではA)とB)の境界は八丈島と種子島とのチルユニット積算値の平均、B)とC)の境界は種子島と名瀬とのチルユニット積算値の平均として判定することにした。すなわち、A)の地点はチルユニット積算値の平均が755.7以上、B)の地点は755.7未満、143.7以上、C)の地点は143.7未満として判定した。

開花しないという基準は、DTS積算値が $DTS_{cr}$ に達しない場合という判定の仕方もある。チルユニット積算値が $C_1$ に達しなければ、絶対に開花しない。 $C_1$ に達しても、それが小さい場合は開花に至らないと考えられる。ただし単純に積算期間を延ばせば、 $DTS_{cr}$ に到達することもあり得るので、積算期間の最大を決める必要がある。初夏までに開花しなければ開花しないとして、これを5月30日(通日150日)に設定した。このような方法でも開花の有無の判定を行い、上述の方法と比較した。

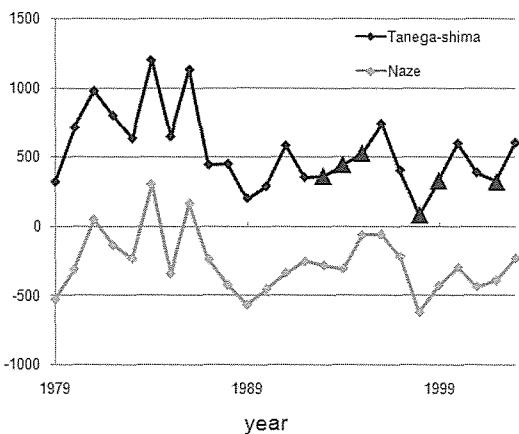


Fig. 6. Accumulated chill-unit values at Tanega-shima and Naze until DOY 70. The triangle indicates years when cherry blossom did not become fullbloomed in Tanega-shima.

## 4. 開花予測の結果と考察

### 4.1 開花日の予測

作成した開花モデルを気候統一シナリオ第2版(2004)の予測気温に適用した。

Fig. 7は、開花モデルを1981～2000年の予測気温に当てはめた予測開花日である。地点位置や標高が違うため、Fig. 4と単純な比較はできないが、標高の低い海岸域ではほぼFig. 4と一致している。

そこで次に将来の予測を行った。Fig. 8, Fig. 9はそれぞれ、2032～2050年、2082～2100年の予測開花日の19年平均を示す。Fig. 8とFig. 9を見ると、両期間とも九州から関東の海岸から離れたところでもまず開花し、その後これらの全域でほぼ同時に開花し、続いて東北で南から順に開花していることがわかる。Fig. 7での1982～2000年平均では南九州から順に北へ開花日が推移していることを考えると、開花日の推移の様子が大きく変わっている。

また、Fig. 10, Fig. 11は1982～2000年からの2032～2050年、2081～2100年の変化をそれぞれ表す。Fig. 10とFig. 11を見ると、両期間とも島しょ部を含む九州や太平洋側の海岸域で開花日が遅くなっていることがわかる。対照的に東北や日本海側、対象となる500 m未満の地域のうち標高の比較的高い地域では大きく早くなっており、西日本から太平洋側の平地ではあまり変化はない。

なお、Fig. 7の1982～2000年からFig. 8の2032

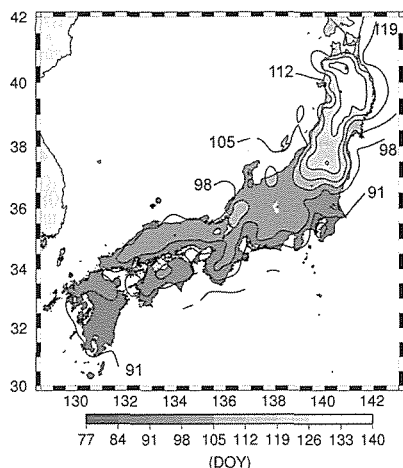


Fig. 7. Forecast flowering date of the average for 19 years of 1982-2000, reproduced by the flowering model. Temperature data are taken from the Japanese Standard Climate Scenario ver. 2 (2004) provided by the Japan Meteorological Agency.

～2050年では開花日の変動はかなり大きいですが、そこからFig. 9の2082～2100年の期間ではあまり変化はない。これは、この期間の変化は海域や北海道では大きいですが、今回の解析対象外である北海道を除いた日本列島の気温は海域に比べると変化は小さいことに起因する(Fig. 2参照)。解析対象である451地点で平均気温の変化を見ると、1982～2000年から2032～2050年では約2.0℃上昇しているのに対し、2032～2050年から2082～2100年では約0.6℃しか上昇していない。ここからこのような結果となったと考えられる。この妥当性については若干議論があるかもしれないが、今後のより精緻な温暖化予測を待ちたい。

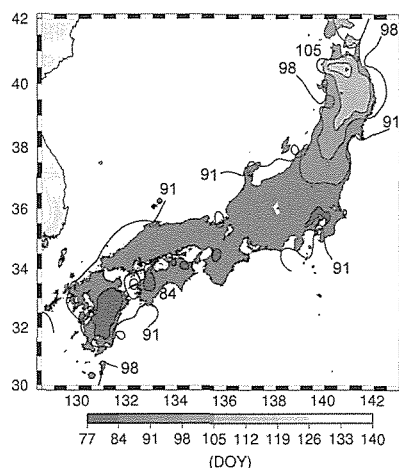


Fig. 8. Forecast flowering date averaged for 19 years of 2032-2050.

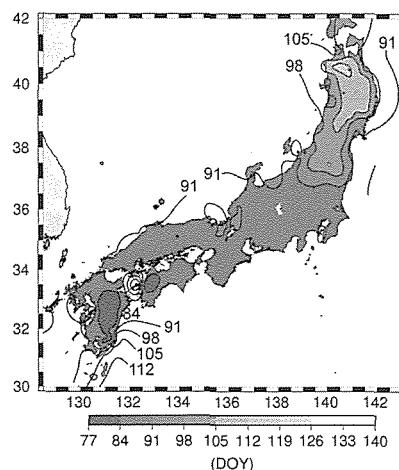


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for 19 years of 2082-2100.

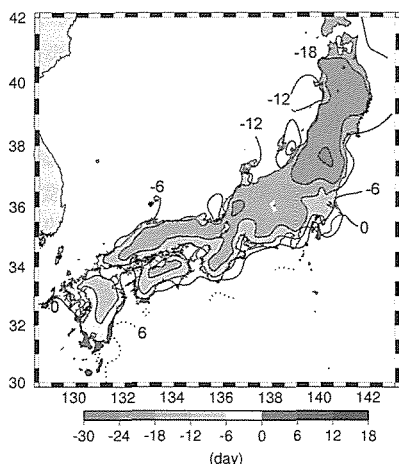


Fig. 10. Difference between two average periods (2032-2050 and 1982-2000) of the forecast flowering date. The dark (light) shade shows regions where the forecast flowering date becomes later (earlier).

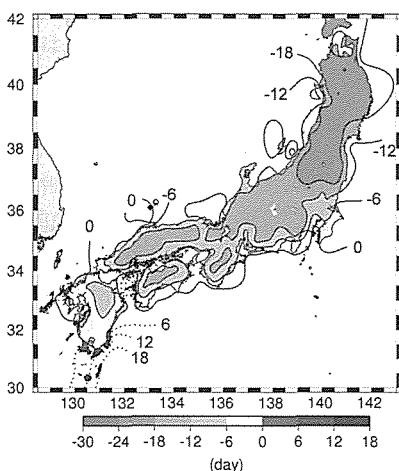


Fig. 11. Same as Fig. 10 except for 2082-2100 instead of 2032-2050.

#### 4.2 開花状況の予測

まず、Fig. 12は1982～2000年の開花状況を示した図である。種子島、屋久島と南九州の一部では年によって満開しない地点があり、全体として現在の状況を再現できていると考えられる。

将来の開花状況を表したのがFig. 13, Fig. 14で、それぞれ2032～2050年、2082～2100年に対するものである。平均チルユニット積算値から見た開花しない地点は、2032～2050年で3地点、2082～2100年で5地点発生した。これらの地点を、開花モデルで開花しない年(19年中)であたると、2032～2050年で12, 11,

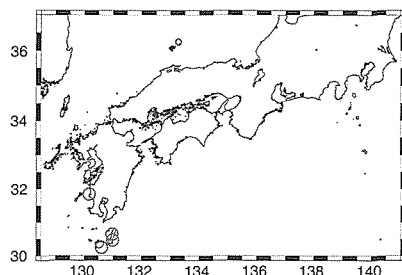


Fig. 12. Flowering conditions in 1982-2000. Circles show the points where the cherry blossoms do not become full-bloomed in some years.

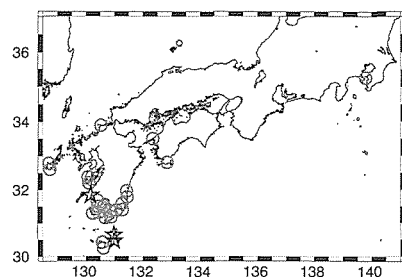


Fig. 13. Flowering conditions in 2032-2050. Stars show the points where cherry blossoms do not flower. The meaning of circles is the same as in Fig. 12.

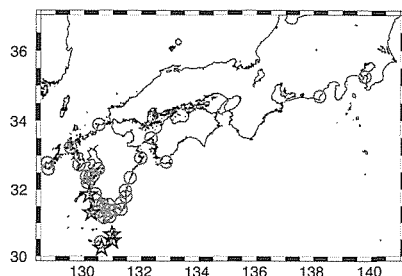
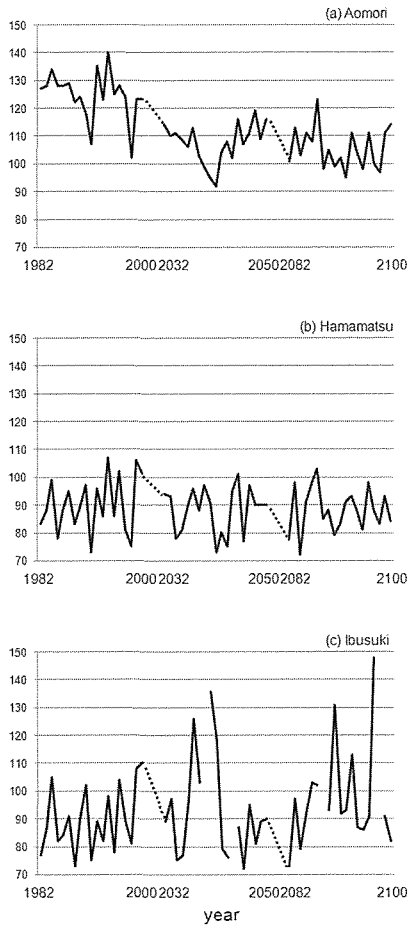


Fig. 14. Same as Fig. 13 except for 2082-2100.

11年、2082～2100年で18, 18, 16, 7, 5年であった。最後の2地点を除いて、過半数の年が開花しないとなっており、整合的である。また2地点でも、4月以前の開花はそれぞれ6年、10年に過ぎず、実質上は開花しない年が多いと言えるかもしれない。開花しても満開しない年がある地点は南九州を中心に2032～2050年では23地点、2082～2100年では30地点発生した。これらの地点のいくつかにおいては、開花モデルで開花しない年もしばしば発生している。

以上のように、開花しなくなる地点、満開しない地点が両方の期間で発生した。開花しなくなる地点は、2082～



**Fig. 15.** Annual forecast flowering date at three grid points near (a)Aomori, (b)Hamamatsu, and (c)Ibusuki. In years when the line breaks up in (c), accumulated DTS does not reach  $DTS_{cr}$  until May 30. The three periods (1982-2000, 2032-2050, and 2082-2100) are shown. The ordinate indicates DOY, while the abscissa shows year.

2100年では現在の南限である種子島をはじめ、南九州の一部でも発生した。これらの地域は冬季に休眠打破が正常に行われない気温になっており、現在の名瀬と同じ生育環境になっていると考えられる。また、満開にならない地点は、2082～2100年では南九州の標高が低い地域のほぼすべてで発生した。これらの地点では現在の種子島と同じ生育環境になっていると考えられる。種子島は現在のソメイヨシノの開花の南限であり、満開しない年が出てくる地点ではさらに温暖化が進むと開花しなくなる地域となる可能性が高い。

#### 4.3 開花日変動の地域差とその要因

Fig. 10, Fig. 11より、両方の期間とも九州や太平洋側の海岸域では開花日は遅く、東北や日本海側、標高の高い地域では早く、西日本から太平洋側の平地ではあまり変わらない結果となった。このことに関連して地域別に年々変動を見ると、Fig. 15のようになる。この図は20 km 格子の地点で、海域と標高500 m以上の地点を除いてそれぞれの都市に最も近い地点を表している。青森付近(a)の地点では早くなり、浜松付近(b)ではあまり変化がなく、指宿付近(c)では次第に遅くなっていることがわかる。また、(c)においてグラフが切れている年は、開花しなかった年である。

まず、(a)の地点、すなわち寒冷地では秋季から冬季にかけての特別気温がチルユニットが積算されない  $12.4^{\circ}\text{C}$  (Table 1 参照) に達することは稀であり、気温が上がってもチルユニットの積算値は大きく変わることはないと考えられる。(a)の地点でのDTS起算日を見てみると、DTS第二起算日が1982～2000年平均では通日 $-2.1$ 日、2032～2050年平均では通日 $7.0$ 日、2082～2100年平均では通日 $13.3$ 日とやや遅くなるものの、比較的变化は小さい。すなわち、この地点ではチルユニット積算値が  $C_1$  や  $C_2$  に達する日は温暖化が進行してもあまり変化はなく、休眠打破の時期はあまり変わらない。しかし、休眠打破が行われたあとのDTSの積算については少しの気温上昇で積算状況が大きく変化し、DTS積算値が  $DTS_{cr}$  に達する時期が大幅に早くなる。実際、DTS第二起算日から予測開花日までに要した日数は1982～2000年平均で126.7日であったが、2032～2050年平均では100.6日、2082～2100年平均では92.2日と、温暖化が進行するにつれて大幅に早くなっている。以上のような理由で、寒冷地では開花日が早くなる傾向にあると考えられる。

反対に(c)のような開花日が遅くなる暖地では、気温が少しでも上昇すると特別気温はチルユニットが負になる  $15.9^{\circ}\text{C}$  を上回ることが多くなっていく。よってチルユニットがなかなか積算されず、休眠打破が遅れることになる。(c)の地点でのDTS起算日を見てみると、DTS第一起算日が1982～2000年平均では通日 $3.7$ 日、2032～2050年平均では通日 $12.1$ 日、2082～2100年平均では通日 $10.1$ 日と、DTS第一起算日に関してはあまり大きな変化はない。しかし、DTS第二起算日を見ると、1982～2000年平均では通日 $127.1$ 日、2032～2050年平均、2082～2100年平均ではチルユニット積算値が  $C_2$  に達しなくなり、大きく遅くなっている。いずれも19年平均で見るとDTS第二起算日の前に開花しているが、半休眠打破期ではDTS積算の際にその日のチルユニット積算値の重みをつけてDTS積算を行うので(式(2)参照)、DTS

第二起算日が遅れることは DTS がなかなか積算されないことを意味している。重みをつける前の DTS は気温が高くなることによって当然大きくなるが、チルユニット積算値が低い値で推移することによって、結果的に DTS がなかなか積算されない。よって DTS 積算値が  $DTS_{cr}$  に達する日が遅れ、(c) のような暖地では開花日が遅くなると考えられる。

あまり変化が見られなかった (b) のような地点は寒冷地と暖地の中間で、DTS 起算日は遅れるが、開花までのチルユニット積算値は (c) の地点ほど低い値では推移せず、単純に気温が高くなることによって DTS 積算値が早く  $DTS_{cr}$  に達する。実際、DTS 第二起算日は 1982 ~ 2000 年平均で通日 54.4 日、2032 ~ 2050 年平均で通日 133.9 日、2082 ~ 2100 年平均で通日 139.0 日と休眠打破は大きく遅れる。しかし、(c) の地点ほどチルユニット積算値が低いまま推移しないため、開花日は 1982 ~ 2000 年平均で通日 90.2 日、2032 ~ 2050 年平均で通日 88.2 日、2082 ~ 2100 年平均で通日 88.1 日となり、この地点では開花日はあまり変化しない。ただし温暖化時では DTS 第二起算日以前の開花であり、その意味での変化は大きい。

## 5. まとめと今後の課題

作成した開花モデルは、全国一律のパラメータを用いることによって、どの地点、どの期間においても、気温データさえあれば開花日が予測できるという、これまでにない特徴を持っている。その作成においては、a) 休眠打破を半休眠打破と完全休眠打破に分け、b) DTS の積算に特別気温を用いるという工夫を加えた。その結果、全国平均の開花日の RMSE は 1979 ~ 2003 年のデータに対して 2.87 日となった。気温のみのデータから開花日を推定したにもかかわらず、先の研究結果と比べてみても、全体的には開花の変動を捉えることに成功したと言える。

将来の開花予測については、地域別に異なった変動の様子が見られた。暖地の海岸域では現在に比べて開花は遅く、寒冷地では大幅に早く、その中間に位置する地域ではあまり大きな変化はなかった。遅くなった地域は、冬季の温暖化による休眠打破の遅れが大きく効いている。

開花・満開の有無の判定は、休眠打破が可能であるかどうかを調べるために、開花の南限である種子島、その南にある名瀬、そして毎年満開になる南限として八丈島のチルユニット積算値を基準にして判定を行った。この基準により、判定は A) 開花し、満開になる。B) 開花するが、満開にならない年がある。C) 開花しない。この 3 種に分類された。C) に関しては、開花モデルで 5 月 30 日までに開花しないという基準も採用した。

2032 ~ 2050 年、2082 ~ 2100 年の両方の期間で種子島や南九州で C) に分類された地点が発生した。また、2032 ~ 2050 年と 2082 ~ 2100 年の両方の期間で、南九州を中心とするかなり広い地域が B) に分類された。すなわち、地球温暖化が進行するとソメイヨシノの開花の南限が北上する。本研究での解析期間では B) と予測した地点も、今後さらに気温が上昇すると C) に分類されるようになり、開花の南限は今回の結果以上に北上すると予測される。

以上のことを踏まえると、これから温暖化の進行に従い、i) まずソメイヨシノの生長が早まり、開花日は早くなる (南限付近を除く)。ii) さらに気温が高まると、休眠打破の遅れが目立つようになって次第に遅くなる。iii) その後、さらに開花は遅れて結果的に現在よりも遅くなる。iv) 満開にならない年が発生する。v) 開花しない年が発生する。vi) 開花しなくなる。これらの過程をたどっていくと考えられる。また場所的には、島しょ部を含む九州から太平洋側の海岸域で、まず開花の遅れや満開にならない年、開花のない年の発生が起こると考えられる。

しかしながら今後に残された課題も多い。まず暖地では開花予測の精度がかなり悪かったことが挙げられる。この最も重要な要因は、休眠打破がうまくモデル化されていないことであろう。Blandier *et al.* (1993) で、暖地では寒冷地で観測されるよりもわずかな低温遭遇で開花まで至る場合があると報告されているように、暖地における開花に対する気温の影響はたいへん複雑である。

ただ純粋にモデリングという立場からはひとつの克服の方向はある。それは、(関係するパラメータ値の変更を含めて) DTS 第一起算日を制限するパラメータ  $ST1$  を合理的に設定するということである。本研究ではこれをどの地点でも 1 月 1 日としたが、本来は八丈島や種子島では制限せずに、他の多くの地域ではより遅い日に設定するのが合理的であると考えられる。客観的にうまくそのように設定できれば、暖地での精度が上げられるであろう。しかしそれが植物学的に正しいかどうかに関する実験的研究はなく、モデリングだけで強引に進めるのは時期尚早かもしれない。

もう一つの大きな問題は開花モデルそのものの持つ限界である。そもそも開花予測というのは 5 輪咲くことを予測しているのだから、木の全体のうち、ごく一部の花芽しか見えていないことになる。開花と満開の間隔がほぼ一定であるなら何の問題もないが、実際には南限付近では年によって大きく変動し、暖冬のときに間隔が大きくなり、満開に至らない年も出てくる。これは暖冬時の休眠打破の進み方は、花芽ごとに差が大きいことを意味している。このような花芽間での進み方の差が大きい現象において、開花

という一部の花芽が起こす振る舞いを予測することは原理的に困難である。南限付近では開花予測が実際の開花より遅れていたが、理由のひとつはこのようなことと考えられる。一方、満開予測ならこの困難は大幅に軽減されるかもしれない。花芽の全体的な振る舞いを予測することになるからである。

開花・満開の有無の判定にも改善の余地がある。特に満開はチルユニットの積算値のみで判定した。現在の判定では種子島と屋久島、南九州の一部がB)に分類され、適切に表現できていると考えられる。しかし、この判定の仕方が時間を超えて適切であるかという点では疑問が残る。開花モデルの限界という問題意識とも関係して、満開予測のモデルを新たに構築するなど、多面的に検討する必要がある。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって、宇都宮大学農学部の本條均教授に文献の提供をいただきました。厚く御礼申し上げます。また2人の査読者および編集委員の青野靖之氏(大阪府立大学)からはていねいなコメントをいただきました。それらによって本論文は大きく改善されました。朝倉利員氏(果樹研究所)にはモデルに関していろいろと議論していただきました。4人に深く感謝します。さらに本研究では気象庁提供による気候統一シナリオ第2版(2004)を利用しました。利用を許可いただいたことに感謝します。また利用に際して、栗原和夫氏(気象研究所)と原沢英夫氏(国立環境研究所)にお世話になりました。お二人にも深く感謝します。

## References

- Aono, Y., and Omoto, Y., 1990: Estimation of blooming date for *Prunus yedoensis* using DTS combined with chill-unit accumulation. *J. Agric. Meteorol.*, **45**, 243–249.
- Aono, Y., and Moriya, C., 2003: A generalized model to estimate flowering for cherry tree (*Prunus yedoensis*) considering both processes of endodormancy completion and development. *J. Agric. Meteorol.*, **59**, 165–177.
- Asakura, T., Sugiura, H., Sakamoto, D., Sugiura, T., and Gemma, H., 2009: Development of a model for predicting bloom time of cherry blossom. *Proc. 2009 annual meeting of the Society of Agricultural Meteorology of Japan*, p. 34. (朝倉利員・杉浦裕義・坂本大輔・杉浦俊彦・弦間 洋, 2009: サクラの満開日を広域で予測するモデルの開発, 日本農業気象学会 2009 年度大会予稿集, p. 34)
- Balandier, P., Bonhomme, M., Rageau, R., Capitan, F., and Parisot, E., 1993: Leaf bud endodormancy release in peach trees: Evaluation of temperature models in temperate and tropical climates. *Agric. For. Meteorol.*, **67**, 95–113.
- Fishman, S., Erez, A., and Couvillon, G. A., 1987a: The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Mathematical analysis of a two-step model involving a cooperative transition. *J. Theor. Biol.*, **124**, 473–483.
- Fishman, S., Erez, A., and Couvillon, G. A., 1987b: The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Computer simulation of processes studied under controlled temperatures. *J. Theor. Biol.*, **126**, 309–321.
- Gilreath, P. R., and Buchanan, D. W., 1981: Rest prediction model for low chilling 'Sungold' nectarine. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **106**, 426–429.
- Konno, T., and Sugihara, S., 1986: Temperature index for characterizing biological activity in soil and its application to decomposition of soil organic matter. *Bull. Nat. Inst. Agroenviron. Sci.* **1**, 51–68.
- Miller-Rushing, A. J., Katsuki, T., Primack, R. B., Ishii, Y., Lee, S. D., and Higuchi, H., 2007: Impact of global warming on a group of related species and their hybrids: Cherry tree (*Rosaceae*) flowering at Mt. Takao, Japan. *Am. J. Bot.*, **94**, 1470–1478.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi Z., 2000: *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, p. 28 (気象庁 [http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc tar/spm/scenario.htm](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/scenario.htm) の訳による)。
- Omoto, Y., and Aono, Y., 1989: Estimation of blooming date for *Prunus yedoensis* by means of kinetic method. *J. Agric. Meteorol.*, **45**, 25–31.
- Parton, W. J., and Logan, J. A., 1981: A model for diurnal variation in soil and air temperature.

- Agric. Meteorol.*, **23**, 205–216.
- 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.
- Saito, H., 1974: *Architectural climate*. Kyouritsu Syuppan, pp. 121–127 ( 齋藤平蔵, 1974: 建築気候. 共立出版, pp. 121–127).
- Shimizu, Y., Hoshika, Y., and Omasa, K., 2007: Prediction of phenological changes caused by global warming in Japan. *Proc. 2007 annual meeting of the Society of Agricultural Meteorology of Japan*, p. 88. (清水 庸・星加康智・大政謙次, 2007: 日本における温暖化時の植物季節の変化予測マップの作成, 日本農業気象学会 2007 年度大会予稿集, p. 88)
- Sugiura, T. and Honjo, H., 1997: A dynamic model for predicting the flowering date developed using an endodormancy break model and a flower bud development model in Japanese pear. *J. Agric. Meteorol.*, **52**, 887–900.
- Sugiura, T., Ito, D., Kuroda, H., and Honjo, H., 2003: Temperatures inhibiting endodormancy completion in Japanese pear flower buds. *J. Agric. Meteorol.*, **59**, 43–49.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., and Bairlein, F., 2002: Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**, 389–395.
- Zhang, X., Tarpley, D., and Sullivan, J. T., 2007: Diverse responses of vegetation phenology to a warming climate. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L19405, doi: 10.1029/2007GL031447.