

気象生態反応に基づくニホンナシの開花予測

大谷義夫

摘要 : 近年の異常気象は、ニホンナシの開花期や収穫期を平年より極端に変動させる等、樹体生育に大きな影響を及ぼしている。このため、安定生産のためには精度良く生育を予測できる技術開発が必要となっている。そこで、開花期を的確に予測するため、異常気象にも対応できるニホンナシ幸水、豊水、にっこりの栃木県に適合した開花予測プログラムを開発した。

開花日は、2つの発育ステージを表す式(自発休眠期: $DVI_1 = DVR_1$, DVI_1 は自発休眠期の発育ステージ, DVR_1 は自発休眠期の発育速度, 他発休眠期: $DVI_2 = DVR_2$, DVI_2 は他発休眠期の発育ステージ, DVR_2 は他発休眠期の発育速度)により予測できる。この予測式の推定誤差は、幸水の開花始で1.1日と極めて小さかった。加えて、開花予測式と長期予報を組み合わせ、早期に予測可能な開花予測プログラムを開発した。本プログラムは、県内10か所における開花予測式を求めることにより、県内全域を網羅することができる。

キ - ワ - ド : ニホンナシ, 生育予測, 開花, 休眠, 気象

Prediction Method for Anthesis of Japanese Pears Based on Weather Habit Reactions

Yoshio OYA

Summary : Recently, unusual weather has significantly affected the growth of Japanese pears; the anthesis and harvesttime of pears varied markedly year by year. The purpose of the study was to obtain the stable production. The program was developed, which can precisely predict the anthesis of Japanese pear 'Kousui', 'Housui' and 'Nikkori' in Tochigi prefecture even under unusual weather conditions.

The anthesis was predicted using the following equations;

$$DVI_1 = DVR_1, DVI_2 = DVR_2$$

Where DVI_1 and DVI_2 were the developmental indexes of mixed bud during the innate and imposed dormancy period, respectively, and DVR_1 and DVR_2 were the developmental rates of mixed bud during the innate and imposed dormancy period, respectively; each rates were dependent on air temperature.

Substituting actual value of air temperature into the equations led to extremely small errors of 1.1 days in the beginning of anthesis of 'Kousui' for the last 20 years. Indeed, the anthesis was correctly predicted from the early development stage using expected air temperature based on a long-term forecast.

The prediction program is useful throughout the whole Tochigi prefecture by calculating the anthesis at ten monitoring sites where are located across the whole prefecture.

Key words : Japanese pear, growth prediction, anthesis, dormancy, weather

緒 言

1993, 1998, 2003年の梅雨期の異常な低温寡照や1994, 2002年の記録的な高温, 1986/1987年から9年間続いた東日本・西日本の暖冬異常等, 近年の地球温暖化に伴い不安定な気象が頻発している⁹⁾。

植物の生育は様々な気象要因の影響を受ける。特に, 露地状態で栽培する果樹はその影響が大きく, 開花期, 収穫期, 果重のみならず, 果実生理障害, 病害虫, 土壌障害等多方面で影響を受ける。そこで, これらの現象を気象要因から, 単に定性的ではなく定量的に評価し生育予測する技術の開発が重要性を増してきている。

開花期の予測はその年の生育を大きく左右し, 催芽前の休眠期防除時期やその後の薬剤散布のローテーション, 花粉の調達, 人工授粉や多目的防災網展張等の雇用の確保に必要不可欠である。早期に予測することで, 余裕を持った管理が可能となり, 気象災害を未然に防ぐことができる。

二ホンナシの開花は, 7月の花芽分化に始まり, 自発休眠期, 他発休眠期を経て4月に開花を迎える。開花は温度の影響が大きいことが知られており, 生育予測技術の研究は, これまで気温と生育との関係を解析して作成されている。古くは, 1932年に7.2 以下の低温に遭遇した時間を積算することにより自発休眠覚醒期を推定する方法が提唱されている²⁰⁾。その後, 開花予測には, 浅野・奥野³⁾, 高間¹⁹⁾が複数の温度域を設定し温度域毎に係数を与えることで, 遭遇した低温を積み上げながら積算していく方法(チルユニット)で, 福井ら⁶⁾, 泉谷・田中⁷⁾, 熊木¹⁰⁾が有効積算温度で, 福井ら⁶⁾が温度変換日数法を応用することで開花予測式を報告している。また, 本県においても金子・松浦⁸⁾が気象要素から予測する式を報告している。

しかし, これらの研究のほとんどが, あらかじめ式の形を決めておき, 実際の栽培データから統計処理によってそのパラメータを決めていく方法であるため, 式の形が実際の生育をどの程度表現しているかは不明である。また, 実際の栽培データから求めたパラメータ(予測式における各係数)は, データ範囲を超える極端な気象条件下では外挿的な予測となるため, 特に異常気象年において精度が問題になる可能性がある。このような問題を解決するため, 杉浦¹⁶⁾は生態実験により二ホンナシの生育を表現する機構的モデルを実証的手法によって構築した。

本研究では杉浦¹⁶⁾, 杉浦・本條¹⁷⁾, 杉浦ら¹⁸⁾の報告をもとに生態実験によって二ホンナシ3品種(幸水, 豊水,

にっこり)の発育と気象要因の関係を明らかにした。また, それらの関係より休眠から開花までを再現できる予測式の実用性を確認するため, 過去の栽培データからの検証を行った。さらに, この予測式を発展させ, 気象庁の長期予報を活用して早期に県内全域で予測可能な開花予測プログラムを開発したので, その結果を報告する。

試験方法

1. 開花予測式の作成

開花予測は杉浦¹⁶⁾の報告をもとに, 本県におけるパラメータを算出し予測式を作成した。

杉浦のモデルは次のとおり, 自発休眠覚醒と他発休眠発育モデルおよびこれらの統合モデルから構成される。

自発休眠覚醒モデル

自発休眠期は, 高温下においても発芽または開花しないステージであり, 低温によって覚醒される。二ホンナシの混合芽が, 自発覚醒に向かって進行していく過程を発育として捉え, その発育ステージについて,

$$DVI_t = \sum_{h=0}^n DVR_h \quad (1)式$$

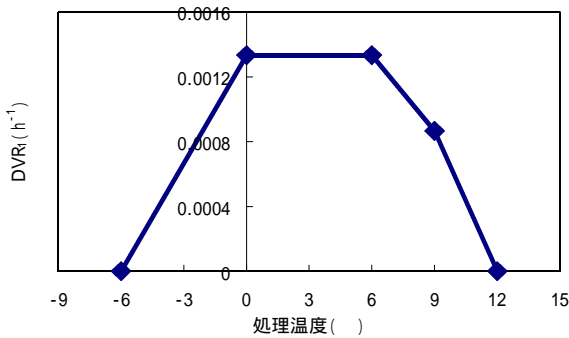
と表した。

DVI_t (発育指数 Developmental Index_t) : 自発休眠期の発育ステージで, DVI_t は低温に遭遇し自発休眠覚醒に向かうに従い大きくなる数値で, 1になる時期が覚醒時と定義する。

DVR_t (発育速度 Developmental Rate_t) : 自発休眠期の混合芽の1時間当たりの発育量で, (1)式はn時間後の混合芽の発育ステージを表す。

温度と DVR_t との関係は, 第1図のとおりで, 0~6 が最も発育速度が高い。これらの関係から, 気温 t () から DVR_t を求める式は次のとおりである。

$$\left. \begin{array}{l} t < -6 \text{ のとき} & DVR_t = 0 \\ -6 < t < 0 \text{ のとき} & DVR_t = 1.333 \times 10^{-3} + 2.222 \times 10^{-4} \times t \\ 0 < t < 6 \text{ のとき} & DVR_t = 750^{-1} = 1.333 \times 10^{-3} \\ 6 < t < 9 \text{ のとき} & DVR_t = 2.276 \times 10^{-3} - 1.571 \times 10^{-4} \times t \\ 9 < t < 12 \text{ のとき} & DVR_t = 3.448 \times 10^{-3} - 2.874 \times 10^{-4} \times t \\ 12 < t \text{ のとき} & DVR_t = 0 \end{array} \right\} (2)式$$



第1図 自発休眠期の処理温度とDVR₁ との関係(杉浦¹⁶⁾)

他発休眠発育モデル

他発休眠期は、高温によって発芽や開花が促されるステージである。

他発休眠期における混合芽の発育ステージをDVI₂ と表記し、DVI₂ は高温によって開花へ向かうに従い大きくなる。ここで、温度処理開始時のDVI₂ を0、開花期のDVI₂ を1と定義する。1時間当たりのDVI₂ の変化量(他発休眠期の発育速度)をDVR₂ とすると、自発休眠覚醒n時間後のDVI₂ は、

$$DVI_2 = \int_{h=0}^n DVR_2 \quad (3)式$$

と表すことができる。

幸水・豊水における気温と開花との関係より、20 を転換点とする2つの近似式が導き出されている。気温tからDVR₂ を求める式は次のとおりである。

< 幸水 >

$$\left. \begin{array}{l} t < 20 \text{ のとき} \\ DVR_2 = 2.078 \times 10^{15} \exp(-12094(t+273)^{-1}) \\ 20 < t \text{ のとき} \\ DVR_2 = 338.2 \exp(-3474(t+273)^{-1}) \end{array} \right\} (4)式$$

< 豊水 >

$$\left. \begin{array}{l} t < 20 \text{ のとき} \\ DVR_2 = 1.837 \times 10^{15} \exp(-12014(t+273)^{-1}) \\ 20 < t \text{ のとき} \\ DVR_2 = 927.6 \exp(-3419(t+273)^{-1}) \end{array} \right\} (5)式$$

統合モデル

他発休眠は、自発休眠覚醒直後から他発休眠のステージに移行するのではなく、あるステージまで自発休眠が継続され、その後他発休眠ステージに移行する¹⁹⁾。

開花期推定のための混合芽の発育ステージをDVI₁、混合芽の1時間当たりの発育速度をDVR₁ とすると

$$\left. \begin{array}{l} DVI_1 = DVR_1 \\ DVI_1 < 2.2 \text{ のとき } DVR_1 = 0 \\ DVI_1 > 2.2 \text{ のとき } DVR_1 = DVR_2 \end{array} \right\} (6)式$$

(1) ~ (6)式により開花期が推定できる。

DVR₁ = 1.0 となった時点が開花期(開花中央日)となる。

1) 休眠期の発育と気温の関係の検証

自発休眠覚醒式は、品種による差は小さい¹²⁾ため、(1)、(2)式を用いた。

他発休眠期の発育と気温との関係解析のために、露地で栽培している幸水、豊水、にっこりを供試し、自発休眠が十分完了したと思われる結果枝を2004年1月30日に採取し、2 の冷蔵庫で保存後、2月16日に恒温室に入庫し温度処理を開始した。処理区は、5、9、13、17、21、25 および30 の7区とした。光は全ての区とも蛍光灯(20W)を常時点灯した。使用した切り枝は、各処理区10本とし、先端から25cmに切り揃え、頂芽のみを残し他の芽は取り除いた。生育調査は毎日8:00、13:00および18:00に行い、総芽数の8割以上が催芽した日を催芽日、総開花数の3割以上開花した日を開花始、8割以上開花した日を開花盛とした。

対照として、当场果樹園で露地栽培している成木の生育調査も、併せて行った。気象データは、気象ロボット(アグリウエザー社製 Weather Bucket TA-WL-1S)の毎正時ごとの気温データを用いた。

2) 休眠期発育式の統合とその有効性の検証

催芽日と開花日(開花始および開花盛)のデータは、幸水、豊水では、当场における1984年~2003年の延べ20年間、にっこりは1993年~2003年の10年間とした。

なお、気象データの実測値は宇都宮アメダスの特別値を用いた。

データ解析は、アメダスの毎正時の気温データを、自発休眠覚醒期を推定する(1)、(2)式および他発休眠期の生育を推定する式(3)、(4)、(5)式)に適用しその計算結果が実測の催芽期、開花始、開花盛においてどのような値をとるかを解析することにより行った。このとき、両式の統合方法を異にした以下の2つの式を検討した。

(1) 自発休眠期と他発休眠期をつなぐ予測式 1

実測の気温を(1)、(2)式に適用し、DVI₁=1(自発休眠が覚醒したと考えられるステージ)となった時点で(3)、(4)、(5)式に実測の気温を適用してDVI₂ の計算を

開始した。この場合、開花期を推定するための発育ステージを DVI_t 、発育速度を DVR_t と表記すると

$$\left. \begin{aligned} DVI_t &= DVR_t \\ DVI_t &= 1 \text{ のとき } DVR_t = 0 \\ DVI_t &> 1 \text{ のとき } DVR_t = DVR_2 \end{aligned} \right\} (7) \text{式}$$

である。

(2) 自発休眠期と他発休眠期をつなぐ予測式 2

実測の気温を(1)、(2)式に適用し、 $DVI_t=1$ となった後も低温積算期間を延長し、 $DVI_t=1+$ (>0)となった時点で(3)、(4)、(5)式を用いて DVI_2 の計算を開始した。この場合は、

$$\left. \begin{aligned} DVI_t &= DVR_t \\ DVI_t &= 1+ \text{ のとき } DVR_t = 0 \\ DVI_t &> 1+ \text{ のとき } DVR_t = DVR_2 \end{aligned} \right\} (8) \text{式}$$

である。の値を0から0.2単位で変動させ、予測式の開花期の計算値と実測値を比較した。

2. 開花予測プログラムの開発

1) 気象予報を組入れた開花予測プログラムの開発

開花予測プログラムは、1. 2) 統合モデルを基礎とし、予測気温を代入するプログラムとした。

予測日以降の気温は、日本気象協会の発表する長期予報(3カ月予報, 1カ月予報)の予想気温とし、予想気温を1. 2) 統合モデルに代入し、催芽日、開花始、開花盛を算出した。

また、県内の各産地に設置してあるナシ生育診断ほ10ほ場(以下診断ほ)ごとに、アメダスデータを1. 2) 統合モデルに代入し、幸水、豊水の開花始、開花盛の DVI_2 の値を算出した。

診断ほおよびアメダスの地点は、大田原市湯津上(大田原アメダス, 観測所番号41141)、高根沢町大谷(烏山アメダス, 同41246)、那須烏山市福岡(烏山アメダス, 同41246)、河内町下田原(宇都宮アメダス, 同41277)、鹿沼市武子(鹿沼アメダス, 同41271)、芳賀町稲毛田(真岡アメダス, 同41331)、岩舟町静和(小山アメダス, 同41376)、佐野市上羽田町(佐野アメダス, 同41361)、小山市東黒田(小山アメダス, 同41376)を用いた。

2) 開花予測プログラムの検証

開花予測プログラムの適合性を検証するため、農業試験場(以下、農試)、大田原市湯津上(以下、湯津上)、佐野市上羽田町(以下、佐野)は2004/2005年, 2005/2006年に、高根沢町大谷(以下、高根沢)、那須烏山市福岡

(以下、南那須)、河内町下田原(以下、河内)、鹿沼市武子(以下、鹿沼)、芳賀町稲毛田(以下、芳賀)、岩舟町静和(以下、岩舟)、小山市東黒田(以下、小山)は2005/2006年に、開花予測プログラムに長期予報をもとにした予想気温を代入し、開花始、開花盛を算出した。その結果が実測値においてどのような値をとるかを解析した。また、松浦ら¹¹⁾が作成した開花予測式と比較した。

施設栽培での出荷計画を立てる上で、温度管理や被覆時期は重要な事項であり、特に開花期までの温度管理は収穫時期に大きく影響する。そこで、雨よけ栽培で休眠覚醒後に被覆栽培した場合の幸水の開花日をシミュレーションした。2004/2005年, 2005/2006年に被覆開始後の気温を開花予測プログラムに代入し、開花始、開花盛を算出し、その結果と実測値についての関係を解析した。

なお、ビニル被覆日は2005年は3月17日、2006年は3月14日だった。

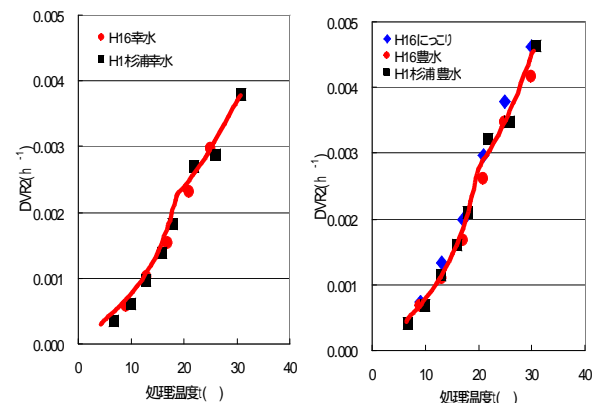
試験結果および考察

1. 開花予測式の作成

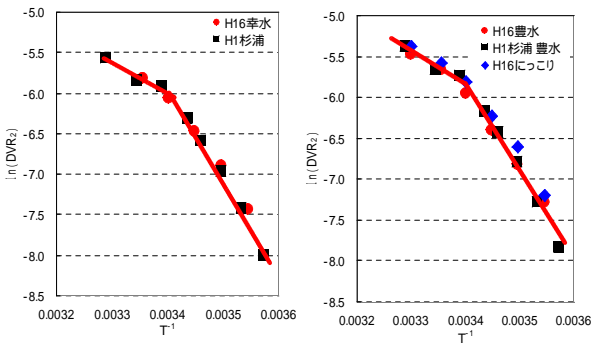
1) 休眠期の発育と気温の関係の検証

他発休眠期は、高温によって発芽や開花が促されるステージである。

各品種毎の休眠枝に対する温度処理開始から開花期までの所要時間を第1表に示した。また、 DVR_2 と処理温度 t ($^{\circ}\text{C}$)の関係を示した。5 から30 $^{\circ}\text{C}$ の間では高温ほど開花までの所要時間が短く発育速度が大きくなった。また、にっこりは豊水と酷似した。両者の関係を数式化するために第3図に $\ln(DVR_2)$ と T^{-1} をプロットした。 $T(k)$ は t ($^{\circ}\text{C}$)の絶対温度である。この図から、 $\ln(DVR_2)$ と T^{-1} は、5 ($T^{-1}=0.00360$)から17 ($T^{-1}=0.00345$)まではほぼ直線関係にあることが示された。21 ($T^{-1}=0.00340$)以上はこの直線からはずれるため、第3図に示したとおり20 ($T^{-1}=0.00341$)を転換温度とする2直線で近似した。その結果が、(9)、(10)式である。



第2図 処理温度 t と DVR_2 との関係



第3図 T^{-1} と $\ln(DVR_2)$ の関係

第1表 開花に及ぼす温度と開花までの所要時間の関係

品種	処理温度	催芽		開花始		開花盛	
		時間(h)	(月/日)	時間(h)	(月/日)	時間(h)	(月/日)
幸水	30	144	(2/22)				
	25	192	(2/24)	336	(3/1)	360	(3/2)
	21	240	(2/26)	432	(3/5)	480	(3/7)
	17	360	(3/2)	648	(3/14)	696	(3/16)
	13	528	(3/9)	984	(3/28)	1,056	(3/31)
	9	888	(3/24)	1,704	(4/27)	1,920	(5/6)
	5	1,728	(4/28)				
豊水	30	120	(2/21)	240	(2/26)		
	25	168	(2/23)	288	(2/28)	312	(2/29)
	21	192	(2/24)	384	(3/3)	432	(3/5)
	17	312	(2/29)	600	(3/12)	648	(3/14)
	13	480	(3/7)	912	(3/25)	984	(3/28)
	9	816	(3/21)	1,464	(4/17)	1,632	(4/24)
	5	1,680	(4/26)				
にっこり	30	120	(2/21)	216	(2/25)	936	(3/26)
	25	168	(2/23)	240	(2/26)	288	(2/28)
	21	192	(2/24)	336	(3/1)	384	(3/3)
	17	288	(2/28)	504	(3/8)	552	(3/10)
	13	408	(3/4)	744	(3/18)	816	(3/21)
	9	672	(3/15)	1,344	(4/12)	1,464	(4/17)
	5	1,512	(4/19)				

< 幸水 >

$$\left. \begin{aligned} t = 20 \text{ のとき } \ln(DVR_2) &= 35.27 - 12094 T^{-1} \\ 20 < t \text{ のとき } \ln(DVR_2) &= 5.82 - 3474 T^{-1} \end{aligned} \right\} (9) \text{式}$$

< 豊水・にっこり >

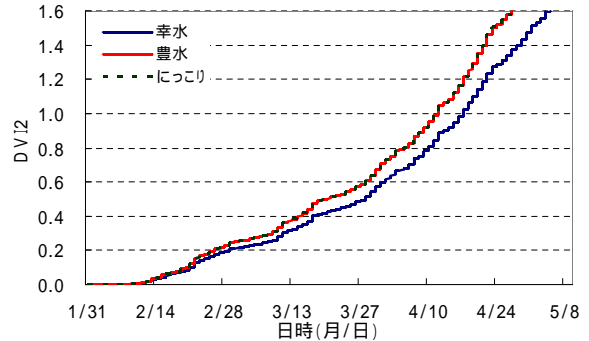
$$\left. \begin{aligned} t = 20 \text{ のとき } \ln(DVR_2) &= 35.15 - 12014 T^{-1} \\ 20 < t \text{ のとき } \ln(DVR_2) &= 6.83 - 3719 T^{-1} \end{aligned} \right\} (10) \text{式}$$

これらの式を変形し、得られた DVR_2 と t () との関係を示す式は、(4)、(5)式と同じであった。

(3)、(4)、(5)式の予測式の適合性を検討するため、当場に栽植されているニホンナシの成木の開花期の推定を行った。開花期の推定を行った樹は、温度処理実験に供試した切り枝と同一樹であり、温度処理開始以前において、同じ気象条件下で生育していた。

(4)、(5)式に当該気象ロボットの毎正時の気温データを代入し DVR_2 を求めた。(3)式によって自発休眠覚醒後の1月31日以降の DVI_2 の推定値を求めた(第4図)。この DVI_2 から得られた開花期の推定値 ($DVI_2 = 1$ となった

日)は、にっこりは4月14日(実測値は4月15日)、豊水は4月14日(実測値は4月16日)、幸水は4月17日(実測値は4月18日)であった。推定値と実測値との差は2日以内となり、この式の正当性が証明された。



第4図 農試における DVI_2 の経過

DVI_2 は2004年1月31日から起算した。

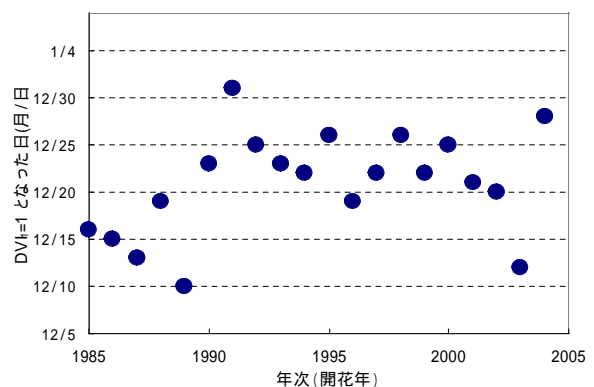
2) 休眠期発育式の統合とその有効性の検証

実際の開花予測では、自発休眠期と他発休眠期両者の式を統合させる必要がある。1.1)の切り枝を用いた試験では、他発休眠期式の起点日を十分自発休眠が覚醒した日としたため、自発休眠覚醒から何日か経過していたと想定され、両者の接続点は明らかではない。また、他発休眠ステージにおいて低温を与えた場合、開花に必要な高温の時間数が短くなることも知られている⁵⁾。

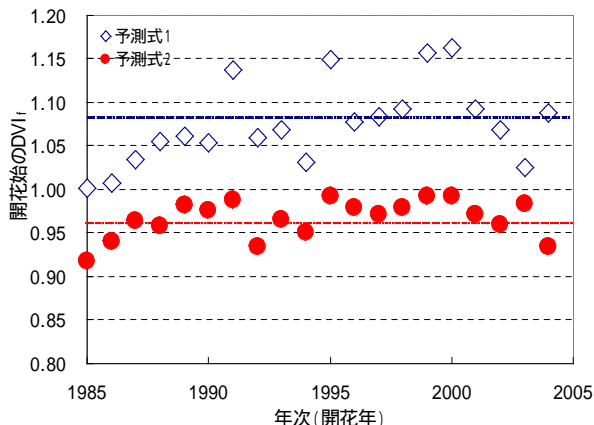
そこで、2つの式の最適な統合方法を検討し、開花予測式を完成させ、予測式の有効性を検証した。

(1) 自発休眠期と他発休眠期をつなぐ予測式1の場合

幸水において(1)、(2)式から求めた農試の $DVI_{t=1}$ となった時期(自発休眠が覚醒したと考えられる時期)を第5図に示した。これは、12月上旬から1月上旬まで約1か月の期間に分布した。予測式1によって求めた実際の開花始における DVI_t の計算値を第6図に示した。この予測式での開花始の DVI_t の計算値と実測値との標準偏差は0.047で、精度が低かった。



第5図 過去20カ年における $DVI_t = 1$ となった日(幸水)

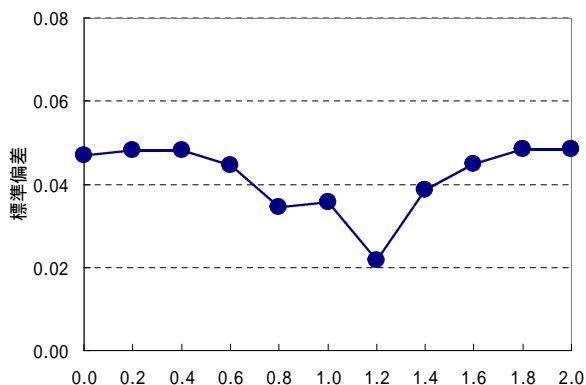


第6図 予測式1および予測式2 (=1.2) で計算したときの実測の開花始における DVI_t (幸水) . 破線は平均値 .

(2) 自発休眠期と他発休眠期をつなぐ予測式2の場合

予測式2の を0から0.2単位で変動させ、それぞれの実測の開花始における DVI_t の値、および予測式2での開花始の DVI_t の計算値と実測値との標準偏差を求めた(第7図) . 標準偏差は が0.8~1.4のとき小さくなり、特に =1.2 のとき最低の0.022となった . これは予測式1のときの標準偏差0.047の半分以下だった .

=1.2 の時の実測の開花始における DVI_t の値を第6図に示した . DVI_t は0.972を中心に分布した . なお、豊水、にっこりも同様に、 =1.2 のとき標準偏差が最低となった .



第7図 予測式2における を変動させて求めた実測の開花始における DVI_t の標準偏差(幸水)

(3) 開花期を予測する式

予測式2の結果より、杉浦¹⁶⁾の報告と同様に自発休眠覚醒以降も自発休眠覚醒式を継続し、 =1.2 ($DVI_t=2.2$) をすぎた時点で他発休眠発育式に移行することにより実際の開花始との誤差が小さくなり、最も精度の良い開花始を推定することができることが明らかとなった . 開

花予測式は次のとおりである .

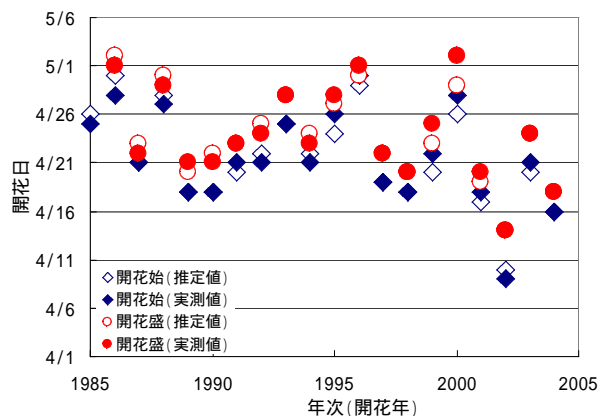
$$\begin{aligned}
 DVI_t &= DVR \\
 \text{とすると,} \\
 DVI_t & \leq 2.2 \text{ のとき } DVR_t = 0 \\
 DVI_t & > 2.2 \text{ のとき } DVR_t = DVR_2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

以上のことにより、幸水の開花期は(1)、(2)、(3)、(4)、(11)式により、同様に豊水・にっこりは(1)、(2)、(3)、(5)、(11)式により予測できる .

(4) 予測精度の検証

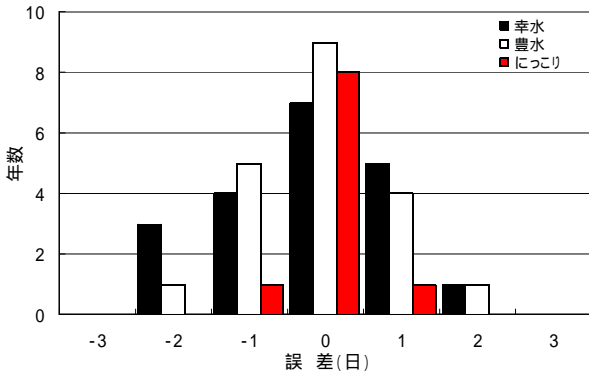
予測式の予測精度を検証するため、実測の気温データを(1)、(2)、(3)、(4)、(11)式に代入して幸水の開花始を推定した . また、予測式2を用い、 =1.2 を実測の開花盛に適用した時の DVI_t を求め開花盛も推定した . なお、開花盛での DVI_t は1.048であった .

過去20年における実測の幸水の開花始は4月9日から4月30日まで約3週間の幅で分布したが、推定値は良く適合し、推定誤差(RMSE: 平均2乗誤差の平方根)は、開花始で1.12日、開花盛で1.10日であり、実測と推定日の差は最も誤差の大きい日でも2日であった . これらの推定誤差は測定誤差に含まれてしまう程度であり、予測式の精度は極めて高いと考えられた(第8図) .



第8図 予測式から推定した開花日と実測の開花日(幸水)

なお、同様の方法で、豊水、にっこりの予測式を構築した . 豊水の開花始での DVI_t は1.062 , 開花盛での DVI_t は1.140 , にっこりの開花始での DVI_t は0.955 , 開花盛での DVI_t は1.089 であり、すべての品種で実測と推定値の差は2日以内であった(第9図) .



第9図 予測式推定値と実測の開花始の誤差(年数で示す)
(幸水・豊水20年，につこり10年の予測結果)

2. 開花予測プログラムの開発

1) 気象予報を組入れた開花予測プログラムの開発

本県で従来使用していたプログラムはDOS版であり，現在のパソコンでは使用しづらいものであった．また，異常気象時での予測精度が低かった．そこで，2005年9月1日1時以降の毎正時の気温および気象庁発表の3カ月，1カ月予報の気温の予想から3月上旬以降の気温を予想し，(1)，(2)，(3)，(4又は5)，(11)式による開花予測式に代入し，催芽期，開花日(始，盛)を予測した(第10図)．

このプログラムはWindows版である．さらに(1)，(2)，(3)，(4又は5)，(11)式およびこの開花予測プログラムに，1996年～2005年の気温および各診断ほの開花期を代入し県内全域を網羅できる開花予測プログラムを開発した(第10図)．各診断ほでの開花予測に用いる DVI_2 は第2表のとおりである．

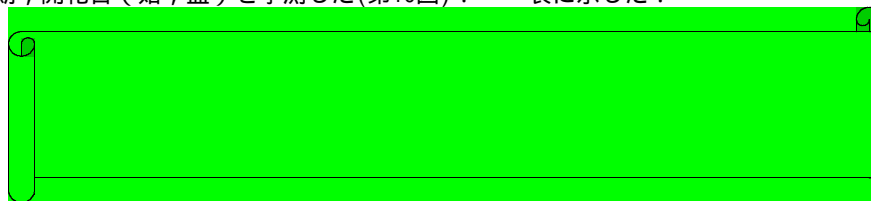
第2表 品種別の各診断ほでの DVI_2 (1996～2005年)

診断ほ	幸水		豊水		につこり	
	催芽期	開花始	催芽期	開花始	催芽期	開花始
湯津上	0.860	0.950	0.942	1.015		
高根沢	0.965	1.050	1.095	1.152		
南那須	0.908	0.990	1.000	1.050		
河内	1.000	1.078	1.095	1.167		
農試	0.613	0.972	1.048	0.655	1.062	1.140
鹿沼	0.865	0.930	0.940	1.015		
芳賀	0.880	0.945	0.950	1.030		
岩舟	0.910	0.990	0.980	1.055		
佐野	0.835	0.910	0.915	1.005		
小山	0.940	0.990	0.970	1.050		

注:農試の幸水,豊水は1985～2004年,につこりは1995～2004年

2) 開花予測プログラムの検証

開花予測プログラムの予測値と実測値との差を第3，4表に示した．



予測年 **2006** 予報 発表日 **3/3** 発表日 **3/3**
 1ヶ月予報 1週目 **1**
 2週目 **0**
 3-4週目 **0**
 3ヶ月予報 4月 **0**
 5月 **1**

入力方法
 予報発表日
 301-307を入力
 予報内容(気温)
 高い **1**
 平年並 **0**
 低い **-1**

農業試験場
 本年の自発休眠覚醒時期 **12/31** (平年 12/30)
 自発休眠覚醒～2/未までの気温 **2.9** (平年 3.0)

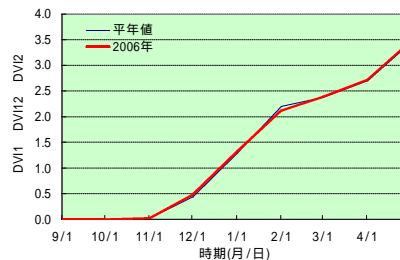


図 ナシ(幸水)の生育指数(DVI):農試

幸水 2/未までのDVI **2.38** (平年値 2.36)

地点	開花始			開花盛		
	本年	準平年差	昨年差	本年	準平年差	昨年差
湯津上	4/24	2日	-2日	4/28	3日	-2日
高根沢	4/22	2日	-2日	4/25	3日	-2日
南那須	4/25	4日	-1日	4/28	4日	0日
河内	4/23	1日	-3日	4/26	2日	-2日
農試	4/22	1日	-3日	4/25	1日	-3日
鹿沼	4/24	4日	-2日	4/27	5日	0日
芳賀	4/24	3日	-2日	4/27	4日	-1日
岩舟	4/19	3日	-2日	4/22	3日	-2日
佐野	4/16	0日	-3日	4/19	1日	-4日
小山	4/20	2日	-2日	4/22	2日	-3日
平均値	4/22	2日	-3日	4/25	2日	-2日

準平年差、昨年差が-は早まることを、+は遅れることを示す



農業試験場の準平年値

地点	開花始	開花盛
幸水	4/21	4/24
豊水	4/18	4/21
につこり	4/16	4/18

豊水 2/未までのDVI **2.38** (平年値 2.38)

地点	開花始			開花盛		
	本年	準平年差	昨年差	本年	準平年差	昨年差
湯津上	4/21	1日	-3日	4/24	2日	-3日
高根沢	4/20	3日	-2日	4/22	3日	-3日
南那須	4/22	3日	-1日	4/24	3日	-1日
河内	4/20	1日	-3日	4/22	0日	-3日
農試	4/19	1日	-3日	4/21	0日	-4日
鹿沼	4/21	4日	-2日	4/24	4日	-1日
芳賀	4/21	3日	-1日	4/24	3日	-1日
岩舟	4/16	2日	-2日	4/18	2日	-2日
佐野	4/14	1日	-2日	4/17	1日	-2日
小山	4/16	1日	-3日	4/18	1日	-4日
平均値	4/19	2日	-3日	4/22	2日	-2日

につこり 2/未までのDVI **2.38** (平年値 2.38)

地点	開花始			開花盛		
	本年	準平年差	昨年差	本年	準平年差	昨年差
農試	4/17	1日	-2日	4/20	2日	-2日

第10図 開花予測プログラムの表示画面

第3表 開花予測式（開花始）の予測値と実測値との誤差（農試2005年）

		3月4日予測		4月7日予測		実測値
		予測日	実測値との誤差	予測日	実測値との誤差	
幸水	現モデル	4月26日	1	4月26日	1	4月25日
	新モデル	4月23日	-2	4月24日	-1	4月25日
豊水	現モデル	4月24日	2	4月24日	2	4月22日
	新モデル	4月21日	-1	4月22日	0	4月22日
にっこり	新モデル	4月19日	0	4月20日	1	4月19日

注：湯津上、佐野においても新モデルは現モデルよりも誤差が小さかった。

第4表 予測値と実測値との誤差（2006年）

地点	幸水開花始			幸水開花盛		
	予測値	実測値	誤差	本年	実測値	誤差
湯津上	4/24	4/23	1日	4/28	4/25	3日
高根沢	4/22	4/23	-1日	4/25	4/26	-1日
南那須	4/25	4/25	0日	4/28	4/27	1日
河内	4/23	4/24	-1日	4/26	4/27	-1日
農試	4/22	4/23	-1日	4/25	4/26	-1日
鹿沼	4/24	4/23	1日	4/27	4/25	2日
芳賀	4/24	4/23	1日	4/27	4/26	1日
岩舟	4/19	4/16	3日	4/22	4/19	3日
佐野	4/16	4/14	2日	4/19	4/17	2日
小山	4/20	4/17	3日	4/22	4/19	3日
平均値	4/22	4/21	1日	4/25	4/23	1日

地点	豊水開花始			豊水開花盛		
	予測値	実測値	誤差	本年	実測値	誤差
湯津上	4/21	4/21	0日	4/24	4/23	1日
高根沢	4/20	4/20	0日	4/22	4/23	-1日
南那須	4/22	4/21	1日	4/24	4/23	1日
河内	4/20	4/20	0日	4/22	4/23	-1日
農試	4/19	4/19	0日	4/21	4/22	-1日
鹿沼	4/21	4/19	2日	4/24	4/22	2日
芳賀	4/21	4/21	0日	4/24	4/24	0日
岩舟	4/16	4/13	3日	4/18	4/16	2日
佐野	4/14	4/12	2日	4/17	4/14	3日
小山	4/16	4/14	2日	4/18	4/17	1日
平均値	4/19	4/18	1日	4/22	4/20	1日

地点	にっこり開花始			にっこり開花盛		
	予測値	実測値	誤差	本年	実測値	誤差
農試	4/17	4/16	1日	4/20	4/20	0日

2006年における各品種の開花始、開花盛とも農試は1日以内、他の県北中部の診断ほほ場は1日程度の誤差で良く適合した。県南部は気象庁の予報より3月上旬～下旬および開花直前の気温が高かったため予測より開花が早まった。県北中部は期間を通じて概ね平年並の気温となったため、予測と良く適合した。プログラムの精度は高いことから、気象予報が的中すれば開花予測は良く適合すると考えられた。

雨よけハウスにおいても、開花予測プログラムに、ビニル被覆前および被覆後の気温を代入して推定した開花盛と実測との差は、1日程度でよく適合した(第5表)。

第5表 施設における予測プログラムの適合性(幸水)

	被覆日	開花盛予測値	実測値	誤差
雨よけハウス	2005年	3/17	4/18	1日
	2006年	3/14	4/14	-2日

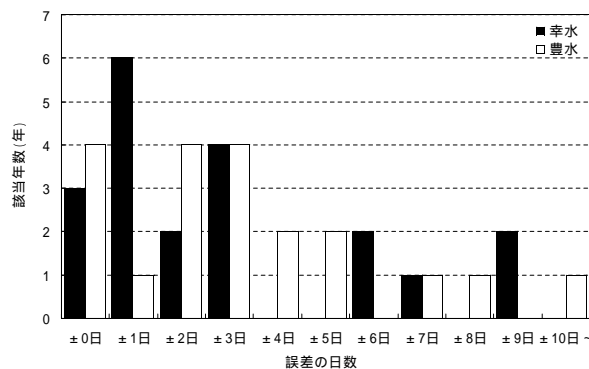
総合考察

果樹栽培において、栽培技術が発達した現在でも、気象は生育を左右する大きな要素であるため、その影響を定量的に評価し、生育を予測することの重要性は極めて高い。また、作期の分散や高単価を得るため施設栽培が導入されているが、環境制御を効率よく行うためには、環境の影響を定量的に評価するシステムが必要である。

本研究は、ニホンナシの気象生態反応について、気象要素から混合芽の発育を推定することができる予測式の作成と、早期に開花期を予測することができるプログラムの開発を目的とした。

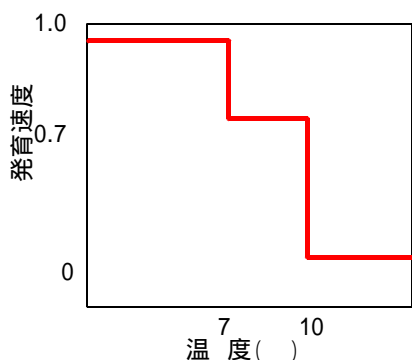
これまでのニホンナシの開花予測は、回帰式により開花期と気温の関係を示したもの^{1), 14)}や、ソメイヨシノの開花日との関係を検討したもの¹⁾、有効積算温度^{6), 7), 10)}、温度変換日数法の理論を用いたもの^{11), 13), 14)}等がある。これらのうち開花前の気象変動にも対応可能なモデルは、有効積算温度と温度変換日数法であり、本県でこれまで用いてきた回帰式による方法では、基準日(3月20日、4月1日、4月11日)以外での予測は困難である。

本県においては、回帰分析により2月11日以降の気温と開花日との関係をもとにした回帰式を利用する方法¹¹⁾、ソメイヨシノの開花日との関係による回帰式を利用する方法¹¹⁾、積算気温を利用する方法¹¹⁾等、数種類の予測方法が存在するが、その予測結果が異なることを数多く経験した。このため、予測日の発表にどの式を使うかについても担当者の勘と経験が必要な場面が多かった。回帰式で使用する気温データについても平均気温、最高気温、最低気温を使う式があり、式によって算出日が異なる。また、近年の暖冬により自発休眠覚醒時期が大きく異なる場合については、予測開始時点ですでに他発休眠ステージが進んでいるため、実測値が予測値よりも早く開花したことがあり、予測値との誤差が大きかったと考えられた(第11図)。



第11図 従来使用していた予測式による開花始予測日と実測値との誤差(3月上旬予測)

このように、開花日を予測する際に他発休眠期のみでの予測では誤差を生じることが多くみられた。他の樹種では自発休眠期はチルユニット¹⁵⁾ (第12図)を積算し、自発休眠から覚醒した後は有効積算温度を用いて積算してゆくGDH(growing degree hours)モデル⁴⁾やGDHモデルを改良したASYMCURモデルが発表されている。また、複数の樹種において、自発休眠覚醒直後は低温も開花促進に有効であることや、自発休眠期において低温を積算するだけでなく高温も積算するモデル²⁾が検討されており、自発休眠期と他発休眠期の境界が明確でない樹種が多いと考えられる。



第12図 チルユニットモデル

本研究では、自発休眠期、他発休眠期の1時間毎の発育速度および両者が混在して進行している期間の発育速度についても検討している。また、1つの予測式によりさまざまな時期、品種で各ステージ(催芽期、開花始、開花盛等)を予測することができる等、休眠ステージに即した汎用性のある開花予測式であるといえる。

さらに、杉浦¹⁶⁾によれば低温要求量やチルユニットは発育速度モデル(DVRモデル)の特殊な一例であり、DVRモデルは有効積算温度によるモデルと比べ精度が高く、また、温度変換日数法とは数学的に同値となることを示した。しかし、温度変換日数法は見かけの活性化エネルギー値を用いる等測定に困難を有する面もあり、気温のみで予測可能なDVRモデルは最も実用的な開花予測式であると考えられる。

本研究は、杉浦¹⁶⁾のモデルを基礎としている。杉浦モデルは、生態実験を基にモデル化をしていることから本県ニホンナシ幸水、豊水においても酷似した成績を得ることができた。しかし、予測モデルの検証数が少ないことや、幸水、豊水のみモデルであるなど制約が多い。本研究では調査地点を10地点とし地点毎のパラメーターを算出するとともに、晩生種のものにっころも加えて予測式を作成した。また、予測式を更に進めて現地に早期に情報提供できるよう、気象予報を活用した予測プログラム

を開発した。にっころは豊水の予測式によく当てはまったことから、早生種は幸水の予測式、中・晩生種は豊水の予測式をもとに、DVR₂のパラメーターを算出することで、多くの品種で予測が可能となると考えられる。また、新たに開発した開花予測プログラムは気象庁の長期予報に依存する部分も大きいだが、精度が向上している1か月予報は信頼性が高く、開花予測値と実測値の誤差が小さかった。今後、生育診断予測事業における活用を通じて県内ニホンナシ生産の安定に寄与することを期待する。

謝辞

ニホンナシの開花予測にあたっては、予測式の作成について懇切な指導を賜った(独)農業・生物系特定産業技術研究機構本部杉浦俊彦研究官(現農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所)に心より感謝する。また、常に温かい御指導と激励をいただいた(独)農業・生物系特定産業技術研究機構果樹研究所環境応答研究室(現農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所)の皆さまに厚くお礼申し上げます。

本研究は過去のデータに多く依存しており、各診断ほにおいてデータ収集に多くの農業改良普及センター、現地担当農家から多大な協力を頂いた。また、当場の生育データの収集には歴代の研究員、技術員に深謝する。

ここに記して心からの感謝の意を表する

引用文献

1. 青木秋広(1985)ニホンナシの開花日の予測について。栃木農試研報 31:77-86
2. 青野靖之・佐藤和美(1996)休眠解除過程を考慮した西日本におけるウメの開花日の推定。農業気象。52:125-134。
3. 浅野聖子・奥野隆(1990)ニホンナシ「幸水」、 「豊水」の自発休眠覚醒時期と低温要求量。埼玉園試研報 17:41-46
4. Ashcroft, G. L., E. A. Richardson and S. D. Seeley. (1977) A statistical method of determining chill unit and growing degree hour requirements for deciduous fruit tree. HortScience. 12:347-348.
5. Cauvillon, G. A. and C. H. Hendershott (1974) A characterization of the "After-rest" period of flower buds of two peach cultivars of different chilling requirements. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 99:23-26
6. 福井謙一郎・石田博人・小西謙(1994)温度変換日

- 数法による日本ナシ‘二十世紀’の開花予測．兵庫
農技研報 42:67-72
- 7．泉谷文定・田中敏美(1972)ナシの発芽および開花
時期の予測について．園学要旨 昭47秋:48-49
- 8．金子友昭・松浦永一郎(1990)気温によるニホンナ
シ幸水の果実肥大予測法．栃木農試研報 37:43-48
- 9．気象庁(2005)異常気象レポート2005
- 10．熊木茂(1980)二十世紀ナシの生育予測に関する研
究．(第 報)開花始日の予測について．新潟園試研
報 10:1-13
- 11．松浦永一郎・金子友昭・三坂猛(1989)ニホンナシ
の生育予測法の策定と着果管理及び収穫適期判定法
の確立．
- 12．西本直行・木崎賢哉・藤崎満(1995)接ぎ木法によ
るニホンナシの低温要求量の解明．園学雑 64別2:
140-141
- 13．小野祐幸・金野隆光・奥野隆・浅野聖子(1988a)
日本ナシの催芽・開花まで日数への温度の影響．農
業気象 44:203-208
- 14．小野祐幸・金野隆光・田村良文・鴨田福也・杉浦
俊彦・奥野隆・浅野聖子(1988b)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
- 15．Richardson, E. A., S. D. Seely and D. R. Walker.
1974. A model for estimating the completion of rest for
'Redhaven' and 'Elberta' peach trees. HortScience. 9:331-
332
- 16．杉浦俊彦(1997)ニホンナシの気象生態反応の解析
と生育予測モデルの開発．京都大学学位論文．
- 17．杉浦俊彦・本條均(1997)ニホンナシの自発休眠覚
醒と温度の関係解明およびそのモデル化．農業気象
53:285-290
- 18．杉浦俊彦・小野祐幸・鴨田福也・朝倉利員・奥野
隆・浅野聖子(1991)ニホンナシの自発休眠覚醒期か
ら開花期までの発育速度モデルについて．農業気象
46:197-203
- 19．高間進(1953)落葉果樹の自発休眠に関する研究．
()自発休眠期の開始，完了並びに自発休眠の深さ
について．信州大紀要 1:189-204
- 20．Weinberger, J. H(1950) Chilling requirements of
peach varieties. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 56:122-128