

原著論文

ウンシュウミカンの発芽・開花における感温特性
の実験による評価^{†1}

緒方達志^{†2}・高原利雄・村松 昇^{†3}・藤澤弘幸^{†4}

独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構

果樹研究所カンキツ研究部

859-2501 長崎県南高来郡口之津町

Experimental Evaluation of Temperature Dependence of
Flower Bud Development in Satsuma Mandarin

Tatsushi OGATA, Toshio TAKAHARA, Noboru MURAMATSU and Hiroyuki FUJISAWA

Department of Citrus Research, National Institute of Fruit Tree Science
National Agriculture and Bio-oriented Research Organization
Kuchinotsu, Nagasaki 859-2501, Japan

Summary

To improve the flowering date estimation of citrus trees using DTS (the number of days transformed to standard temperature) method, effects of temperature on the development of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc. cv 'Okitsu wase' and 'Otsu No.4') flower buds were investigated using potted trees under controlled temperatures from February to flowering.

Some flushes at 10°C and 13°C treatments showed physiological disorder whereas flushes at 15/10°C treatment grew without trouble in spite of the average temperature being lower than 13°C, indicating that temperatures of 15°C or above are necessary in daytime for satsuma mandarin shoots to grow properly.

The developmental rate of citrus flower buds was significantly increased as the temperature rose. The dependence of the developmental rate upon temperature could be described by a single Arrhenius equation range of 10-25°C until flowering. The *E_a* value in the Arrhenius equation, which represents the dependence of the developmental rate upon temperature, was 86.8 kJ·mol⁻¹ (20.8kcal·mol⁻¹). This *E_a* value would be appropriate for estimating the flowering date of satsuma mandarin based on a developmental model derived from Arrhenius' law, regardless of location or cultivar.

Key words: flowering date, *Citrus unshiu* Marc., DTS method, Arrhenius equation

†1 果樹研究所業績番号：1398

(2005年6月8日受付, 2005年11月2日受理)

本報告の一部は平成12年度園芸学会九州支部会で発表した。

†2 現 国際農林水産業研究センター沖縄支所 907-0002 沖縄県石垣市

†3 現 近畿中国四国農業研究センター特産作物部 765-8508 香川県善通寺市

†4 現 果樹研究所企画調整部

緒 言

果樹の開花日予測は、発育速度論的予測法が用いられるようになり（小野ら, 1987; Ono and Konno, 1999）、従来の回帰式による方法と比べて精度が大きく向上した。たとえばカンキツでは、発育速度論的予測法の一つである温度変換日数法により過去の開花日について概ね3日以内で推定できることが示されている（林田ら, 1998; 矢羽田ら, 1995）。

温度変換日数法は、設定した起算日からある温度条件（標準温度）下で一定の日数だけ発育すると開花等に至るとしたうえで、自然条件での発育状態を標準温度での発育日数（温度変換日数：days transformed to standard temperature (DTS)）に変換して開花等に至る過程の現在の発育程度を求める方法であり、DTS法とも呼ばれる。自然条件における温度変換日数の算出は、アレニウスの式から導かれる各温度での発育速度を用いて行う。このため、発育速度の温度依存性を表すパラメータとして感温特性値（アレニウスの式における E_a ：見かけの活性化エネルギー）が必要である。このように、温度変換日数法では（1）起算日、（2）開花に必要な温度変換日数、（3）感温特性値という三つのパラメータを用いる。植物の発育速度論に基づいていることから、非常に適応性が高い。

しかし、温度変換日数法は従来の方法よりも精度は高いものの年によっては予測日と実測日が3日以上と大きくずれることがあることや、地域により算出される感温特性値が大きく異なっているなどの問題も残っている（小野ら, 1988; 小野ら, 1990; 小野, 1997）。この原因としては、考慮する気象要因が気温だけであるという温度変換日数法の限界も考えられるが、パラメータの算出方法およびその結果算出されたパラメータの値も大きく影響していると考えられる。すなわち、パラメータを適正化すれば精度向上の余地はまだ十分にあると考える。その理由としては、温度変換日数法は花芽の発育速度がアレニウスの式に従い温度依存するという考えに基づいた発育速度論的手法を用いているにもかかわらず、これまでのところカンキツについては実験的な検証が不十分であり、そのパラメータの算出は過去の気象および開花日のデータからの統計的推定に依存していることが第一に挙げられる。たとえば、ウンシュウミカンやオレンジは気温が高いほど開花が早いことは経験則だけでなく実験でも明らかにされているが（井上, 1989; Moss, 1969）、それについて発育速度論的に感温特性を明らかにした報告はない。ネーブルオレンジについて開花に至る発育モデルを

求めた報告はあるが（Bellows・Morse, 1986）、積算温度を使ったモデルについて過去の気象からパラメータを求めたものであり、実験的に求めたものではない。過去のデータから統計的に求めたものであってもデータの量および質が十分であれば精度の高い値が求められるが、これまでの報告については十分とはいえず、精度に関する検討も行われていない。このようなことから、過去の開花日を気象データから高精度で推定可能な場合であっても、今後の開花日を高精度で予測できる保証はない。

そこで、温度変換日数法によるカンキツ開花日予測の精度向上に資するために、我が国の主要カンキツであるウンシュウミカンについて、パラメータの一つである開花に至るまでの感温特性を、統計的推定法ではなく温度処理による実験的方法によって明らかにした。加えて、温度変換日数法で精度向上のために検討・改善すべき点について考察を行ったので報告する。

謝辞 本論文をとりまとめるにあたり、農研機構 杉浦俊彦博士に貴重な意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

材料および方法

1. 供試樹および温度処理

恒温処理：10号鉢植え2年生‘興津早生’6樹および‘大津四号’3樹を用いた。1999年は2月10日に、2000年は2月16日に自然光人工気象室に搬入し、開花終期まで温度処理を行った。温度条件は、1999年は10、15、20℃の3処理、2000年は13、15、18℃の3処理で、‘興津早生’は各処理2樹、‘大津四号’は各処理1樹とした。湿度はいずれの処理区も発芽まで70%以上に保った。

変温処理：10号鉢植え4年生‘青島温州’6樹を用いた。1990年2月7日に自然光人工気象室に搬入し、開花終了まで温度処理を行った。温度条件は25/15℃（8時から16時まで25℃、16時から8時まで15℃。以下同様。）、15/10℃、10/5℃の3処理で、各処理2樹とした。湿度はいずれの処理区も発芽まで70%以上に保った。

2. 調査方法

芽の過半数が3mm以上に伸長したときを発芽日、つぼみの80%程度が開花したときを満開日とした。なお、同一区内の2樹については、発育の違いがほとんどなかったことから2樹をあわせて発育調査を行った。また、各樹約10個のつぼみについて開花まで経時的に縦径（がく基部から花弁先端まで）を測定した。

Table 1. Dates of sprouting and full bloom of Satsuma mandarin trees examined.

Cultivar	Temperature (°C)	Date of starting treatment	Sprouting		Full bloom	
			Date	DAT ^z	Date	DAT ^z
Okitsu wase	10	2/10/1999	3/21	39	6/15	125
	15	2/10/1999	3/1	19	4/8	57
	20	2/10/1999	2/21	11	3/14	32
	13	2/16/2000	3/18	31	5/11	85
	15	2/16/2000	3/10	23	4/17	61
	18	2/16/2000	3/4	17	3/30	43
Otsu No.4	10	2/10/1999	3/25	43	6/18	128
	15	2/10/1999	3/3	21	4/13	62
	20	2/10/1999	2/22	12	3/18	36
	13	2/16/2000	3/18	31	5/14	88
	15	2/16/2000	3/10	23	4/20	64
	18	2/16/2000	3/4	17	4/3	47
Aoshima	25/15 ^y	2/7/1990	-	-	3/17	38
	15/10 ^y	2/7/1990	-	-	5/25	107

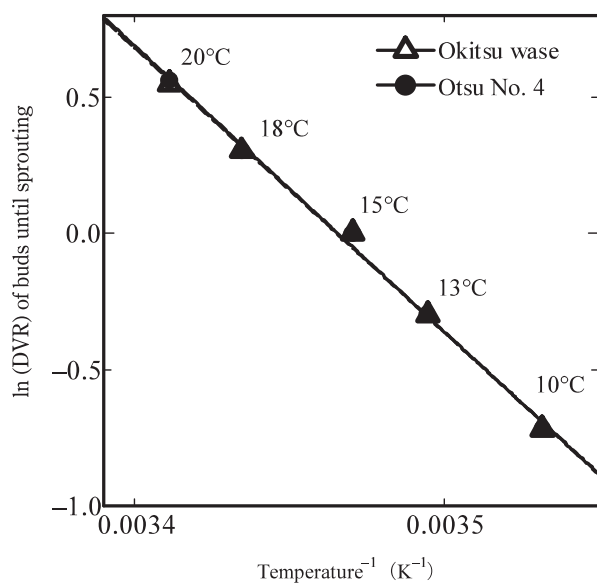
^zDAT: days after treatment^y day/night

Fig. 1. The dependence of the developmental rate (DVR) of satsuma mandarin buds upon temperature. DVRs are expressed in terms of DVR under 15°C treatment = 1. Each line is the linear fit to the data.

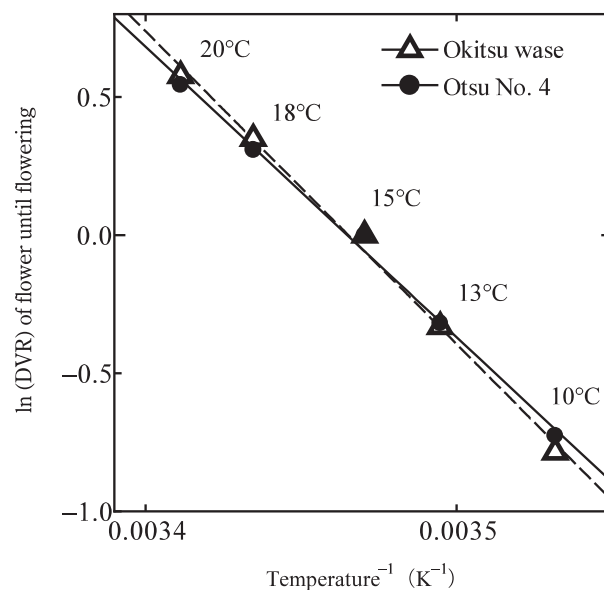


Fig. 2. The dependence of the developmental rate (DVR) of satsuma mandarin flower buds upon temperature. DVRs are expressed in terms of DVR under 15°C treatment = 1. Each line is the linear fit to the data.

結 果

いずれの品種も15°C以上の処理区および15/10°C区では温度処理期間中に発育異常は見られなかった。一方、13°C区では2割程度、10°C区では5割程度のつばみおよび新梢が途中で白化し発育を停止した。このため、これ

らの区では特に発育異常が認められないつばみだけを対象としてつばみの成長調査および開花調査を行った。10/5°C区は、萌芽はしたものの数mmの伸長後は全て発育を停止したため、7月に調査を中止した。

1. 発芽および開花調査

各処理区の出芽日、開花日等をTable 1に示す。高温

区ほど発育が早く、20℃区では3月中旬に満開となったが、10℃区では満開が6月中旬と非常に遅れた。同一温度条件では早生ウンシュウの‘興津早生’が普通ウンシュウの‘大津四号’よりも早く発芽および開花しており、露地条件と同様の傾向がみられた。

‘興津早生’および‘大津四号’の恒温処理での温度と発芽に至る発育速度との関係（アレニウスプロット）をFig. 1に示す。なお、処理後の発育速度は、1999年と2000年のデータを統合して扱うために、両年度で処理を行っている15℃区を1として算出した。すなわち、各処理区の発育速度は（15℃区の発芽までの日数）／（処理区の発芽までの日数）である。温度と発育速度との関係は、図で示したように温度の逆数値と発育速度の対数値について直線での近似が可能であり、アレニウスの式に当てはまることが確認された。図の回帰直線の傾きから得られた感温特性値は、‘興津早生’の発芽日から $Ea=86.5\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、‘大津四号’の発芽日から $Ea=87.1\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ であった。なお、開花日については、10℃区および13℃区において発育異常がみられたため参考であるが、概ねアレニウスの式に当てはまることが確認された（Fig. 2）。回帰直線から得られた感温特性値も同様の理由から参考値であるが、‘興津早生’の開花日から $Ea=92.6\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、‘大津四号’の開花日から $Ea=87.4\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ であった。

2. つぼみの成長調査

つぼみは、15℃以上の区および15/10℃区では開花が近づくにつれて成長が加速し、縦径が20mm程度に達し

たときに開花した。これらのつぼみの成長曲線は開花直前まで指数関数で表すことが可能であった（Fig. 3）。一方、10℃区および13℃区では開花が近づいても成長が加速しないつぼみが多く、指数関数で成長曲線を表すことができるつぼみは少なかった。

つぼみの成長曲線を指数関数で表した場合の係数をTable 2に示す。ここで係数 r は以下に示すように相対成

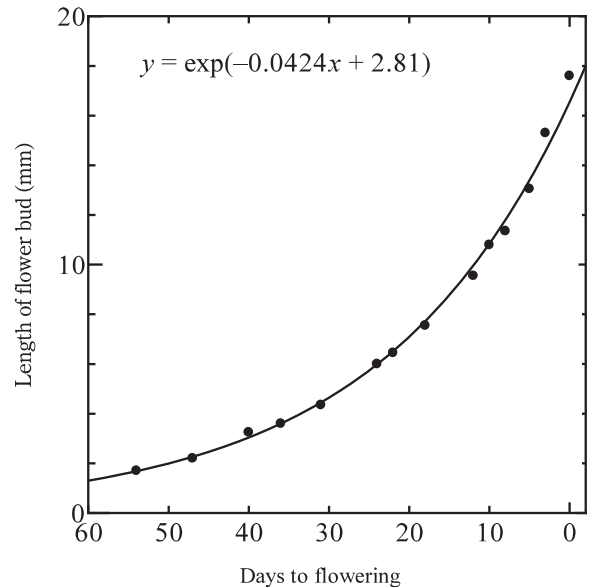


Fig. 3. Growth curve of a satsuma mandarin flower bud under 15/10℃(day/night) treatment. Flower buds showed exponential growth under daytime temperatures of 15℃ or above.

Table 2. The effect of temperature on coefficients of exponential function for growth of flower bud length of satsuma mandarin. The exponential function is $y = \exp(rx - a)$, where y is the length of a bud in mm; x is days post anthesis; and r and a are coefficients.

Cultivar	Temperature (°C)	Coefficients			
		r^z		a^z	
Okitsu wase	10	0.0244	± 0.0025	2.93	± 0.04
	13	0.0525	± 0.0022	2.82	± 0.03
	15	0.0749	± 0.0013	2.94	± 0.01
	18	0.1018	± 0.0010	2.98	± 0.02
	20	0.1228	± 0.0013	2.92	± 0.01
Otsu No.4	10	0.0213	± 0.0007	2.80	± 0.05
	13	0.0474	± 0.0047	2.79	± 0.04
	15	0.0673	± 0.0037	2.91	± 0.02
	18	0.0961	± 0.0020	2.97	± 0.03
	20	0.1153	± 0.0028	2.92	± 0.01
Aoshima unshu	25/15	0.1332	± 0.0021	2.95	± 0.02
	15/10	0.0476	± 0.0017	2.94	± 0.02

^z: Mean±SE

長率であり、指数関数的成長の成長速度を表す値と見なすことができる。

一般的に指数関数的成長の成長量は次式で示される。

$$W = W_0 \exp(rt)$$

W_0 : 最初の植物量

W : t 後の植物量

r : 相対成長率

このため、 t の単位を日とし、1日の1/3を温度 a 、残りを温度 b で処理する場合の t 日後の植物量は次式で示される。

$$W = W_0 \exp(r_a \times t/3) \times \exp(r_b \times 2t/3)$$

$$= W_0 \exp(r_a t/3 + 2r_b t/3)$$

$$= W_0 \exp((r_a/3 + 2r_b/3)t)$$

W : t 日後の植物量

r_a : 温度 a での相対成長率

r_b : 温度 b での相対成長率

すなわち、この場合の1日単位での相対成長率は $r = r_a/3 + 2r_b/3$ である。この式から明らかなように、15℃区および25/15℃区の相対成長率から25℃時の相対成長率が算出可能である。同様に、15/10℃区と15℃区の相対成長率から10℃時の相対成長率が算出可能である。今回の実験で25/15℃区および15/10℃区は‘青島温州’、一方15℃区は‘大津四号’と品種が異なるが、両品種とも毎年度開花期がほぼ同じであること、つぼみの形態にも違いがみられないことから、つぼみの相対成長率およびその感温特性について両品種は実質的に同等とみなして25℃および10℃の相対成長率の算出を行った。具体的な計算は以下の通りである。

25℃時のつぼみの相対成長率:

$$0.1332 \times 3 - 0.0673 \times 2 = 0.2650$$

10℃時のつぼみの相対成長率:

$$(0.0476 \times 3 - 0.0673) / 2 = 0.0377$$

温度と‘大津四号’のつぼみの相対成長率との間の関係をFig. 4に示す。なお、10℃区および13℃区は成長曲線を指数関数で表すことができるつぼみが少なかったことからこれらの区の相対成長率は図示せず、代わりに先ほど‘青島温州’の25/15℃区および15/10℃区、並びに‘大津四号’の15℃区の相対成長率から算出した25℃時および10℃時の相対成長率を図示している。図からわ

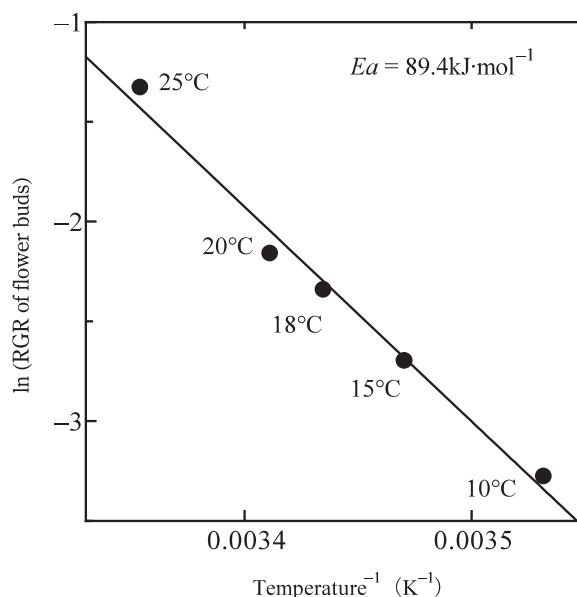


Fig. 4. The dependence of the relative growth rate (RGR) of satsuma mandarin flower buds upon temperature. RGRs at 25℃ and 10℃ are calculated based on RGR treatments at 25/15℃, 15℃, and 15/10℃. The line is the linear fit to the data.

かるように、温度（逆数値）と相対成長率（対数値）との関係は10～25℃の範囲において直線で近似可能であった。図の回帰直線の傾きから得られた‘大津四号’のつぼみ肥大の感温特性値は $Ea = 89.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ であった。品種間でつぼみの相対成長率を比較すると、同一温度条件では‘興津早生’のつぼみの方が‘大津四号’よりも相対成長率が大きく、成長が速かった (Table 2)。

考 察

ウンシュウミカンについて開花まで温度処理実験を行い、発芽・開花までの日数およびつぼみの成長速度について感温特性を求めた結果、開花までのこれらの温度反応は10～25℃の範囲で概ねアレニウスの法則に従うことが確認された。ただし、一部の処理温度で発育異常が観察されるとともに、発芽、開花で感温特性値がやや異なったことから、これらの原因について以下のように考察した。

10℃区および13℃区では一部のつぼみおよび新梢に発育異常が発生した。また、10/5℃区では途中で新梢が発育を停止し、開花には至らなかった。露地条件では発芽前の2月の最高気温が13℃以下の年であっても新梢の発育異常はみられないことから、発芽後の気温が低いことが発育異常の原因と考える。正常な発育に必要な温度については、平均気温が13℃区よりも低い15/10℃区では

発育異常がみられなかったことから、発芽後は最高気温が15℃以上であることが必要条件と推察される。実際、当研究所内（長崎県口之津町）においては、ウンシュウミカン発芽時期の最高気温平年値は15℃以上でこの条件を満たしており、新梢の発育異常も認められない。発育異常の原因としては、低温により樹液の流動が不十分となり、発育に必要な養分の供給が不足したことがその一つとして考えられる。

上記のことから、露地条件における開花日予測に用いる感温特性値としては、15℃未満の処理区における発芽以降の生態情報を用いて算出した値は参考にとどめることとした。また、つぼみの成長速度は開花に至る発育速度を直接表すものではないが、開花時のつぼみの大きさに温度処理による違いはほとんどみられなかったことから発芽後開花に至る発育速度に比例すると考えられる。このため、つぼみの成長速度の感温特性値を、発芽から開花に至る発育速度の感温特性値算出の参考として考慮することとした。

‘大津四号’の開花に至る過程における感温特性値は、発芽日から $Ea=87.1\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、開花日から $Ea=87.4\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、つぼみの相対成長率から $Ea=89.4\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ と発育段階が異なってもほぼ同じ値が得られた。このため、発芽前と発芽後において感温特性に変化はないと考えられる。また、開花日のデータは10～20℃までしかないが、つぼみの相対成長率は10～25℃の範囲でアレニウスの式に適合することが確認されたことから、開花日についても10～25℃の範囲でアレニウスの式に適合すると考えられる。

‘興津早生’の開花に至る過程の感温特性値は、発芽日から $Ea=86.5\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、開花日から $Ea=92.6\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ と後者がやや大きい値であった。しかし、感温特性値について9地域において1973年から1987年までのデータを用いて算出した値（ $Ea=54.4\sim 108.8\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ）とそれらの平均値（ $Ea=83.8\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ）を用いて予測精度を検定した小野（1997）の報告によれば、 $Ea=108.8\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ と平均値よりも25 $\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 大きい値が算出された地域（松山市および大村市）であっても平均値を用いた場合との開花推定日の違いは2日以内である。これに比べて今回みられた差異はこの1/4以下であることから、予測精度への影響は極めて小さいと考えられる。このため、開花日予測においては発芽前と発芽後において感温特性に変化がないとして扱うことが可能である。実際には、10および13℃区において発育異常がみられたことから、これらの区では開花が遅れたために処理温度による開花日の違いが大きくなり、発育異常がない場合よりもやや高い感温特性値が算出されている可能性がある。今回発芽日と開花

日で見られた感温特性値の違いは上記の理由による実験誤差であろうと考える。

‘興津早生’と‘大津四号’の感温特性値を比較すると、発芽日から得られた値は両品種でほぼ同じであり、開花日から得られた値も開花日予測精度にほとんど影響しない程度の差である。このため、開花に至る両品種の感温特性は実質的に同等と言える。一般に、ウンシュウミカンでは品種間で熟期が同じであれば発芽期・開花期もほぼ同じであることから推察すると、他の品種も同様と思われる。すなわち、ウンシュウミカンの開花に至る感温特性は今回用いた品種以外でも同等であり、今回得られた感温特性値はウンシュウミカンの品種によらず利用可能と考える。ただし、発芽・開花日は‘興津早生’が‘大津四号’よりも早く、品種間で違いが認められた。一般的にも同一園地であれば早生ウンシュウが普通ウンシュウよりも早く発芽・開花する。このため、両品種の発芽・開花期の違いは感温特性以外の要因によるものとする。たとえば、果実の成熟期が早いなど樹体の生理的な反応が早くなっているため花芽等の分化開始が早い（すなわち温度変換日数法における起算日が早い）、果実同様開花までの発育が早熟化している（すなわち開花に必要な温度変換日数（DTS）が少ない）などであると推察される。つぼみの成長を比較すると、処理を行ったいずれの温度でも‘興津早生’の方が‘大津四号’よりも相対成長率が大きかったことから（Table 2）、早生ウンシュウの‘興津早生’の方が普通ウンシュウの‘大津四号’よりつぼみの発育も速く、開花に必要な温度変換日数が少ない可能性が高いと考える。ただし、起算日も異なる可能性もある。

以上のことから、ウンシュウミカンの発芽前と発芽後において感温特性に変化はないとともに、10～25℃の範囲内で転換温度はなく感温特性値は一定とみなして問題ないことが明らかとなった。カンキツにおける温度変換日数法は一般的に、（1）感温特性がアレニウスの式に従う、（2）開花までの気温の範囲には転換温度がない、（3）起算日から開花まで感温特性が変化しないことを前提としているが、ウンシュウミカンはこれを10～25℃の範囲で満たすことが確認された。具体的な感温特性値は、発育異常の影響が懸念される開花日の値を用いず、2品種の発芽日から得られた値の平均値である $Ea=86.8\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ （20.8 kcal $\cdot\text{mol}^{-1}$ ）を用いることが適切と考える。

温度変換日数法によるカンキツの開花日予測を行う場合、現状では地域により算出される感温特性値が大きく異なるため、地域ごとに個別に算出した感温特性値を用いている。このため、今回得られた感温特性値も当研究

所近辺の地域以外には適用できないと判断されるかもしれない。しかし、統計的に推定した感温特性値に地域間差が認められていたニホンナシについて、本当に地域間差があるかどうか確認するために13県から切り枝を集めて温度処理により感温特性を評価した報告では、感温特性値に明確な地域間差はみられていない(杉浦ら, 1991)。小野ら(1990)および小野(1997)は、温度変換日数法による早生ウンシュウの開花日予測において各地域で計算された感温特性値およびそれらを平均した値を用いた場合の開花日予測の精度を比較し、両者間で開花日予測の精度に大きな違いがみられないことから、地域共通的な感温特性値を用いた予測の実用性を報告している。植物生理学的に考えても、感温特性は基本的には品種・系統固有の特性と考えるのが適切であり、今回得られたウンシュウミカンの感温特性値は、温度変換日数法による開花日予測で地域によらず使用することができる。なお、小野(1997)が各地の平均として算出し、開花日予測に用いた感温特性値は $Ea=83.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ であり、今回実験的に求めた $Ea=86.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ に近い値である。では、なぜこれまで報告されている感温特性値の推定値に地域間差があるのかについては、後述するように起算日について年度によらず同一日としていること、および感温特性値算出に用いたデータが量または質的に不十分であったことなどにより計算上真の値からのずれが生じたことが原因と考えられる。

最後に、温度変換日数法による開花日予測を行う場合に今後検討すべきと考える事項について考察を行ってみる。温度変換日数法は、カンキツの開花日予測においてそれまでの重回帰式などによる方法よりも予測精度が高いが、それでもパラメータ算出に用いた年度でさえ実測日と予測日が3日以上ずれる場合があることが報告されている(林田ら, 1998; 矢羽田ら, 1995)。これらの報告の中には今回求めた感温特性値とほぼ同じ値を用いたものもあることから、感温特性値以外にも予測精度低下の要因があると考えられる。これについては、日照、降水量等温度以外の気象条件の関与も考えられるが、現在の温度変換日数法のパラメータの設定方法の影響がより大きいと考える。具体的には、起算日を年度によらず同一日とするとともに、起算日から開花まで温度反応特性に違いがないと仮定していることなどである。このため、これらの仮定が誤っていれば予測精度が低下することは明らかである。実際、温度変換日数法によるカンキツの開花日予測は暖冬の年ほど精度が低い傾向にある(未発表)ことは起算日前後にあたる冬季の生態反応特性を十分に組み入れていないことが精度低下の一因であることを示

唆している。

現在は各年度の起算日について判断基準がないため毎年度同一日とすることはやむを得ないことであるが、花芽の発育開始時期は毎年度異なることは十分考えられる。カンキツの花芽分化には多くの環境要因および樹体要因の影響が報告されているものの、日長の影響は認められていないことから(Krajewski・Rabe, 1995)、むしろ毎年異なると考えるべきであろう。では、計算上の起算日と実際の花芽発育開始のずれが開花予測日にどの程度影響するであろうか。ウンシュウミカンの温度変換日数法で算出される起算日は1月20日が最も多く、それ以外でも1月上旬から下旬の間である(小野ら, 1988)。当研究所内の1月の平均気温は約6℃、開花期である5月上旬の平均気温は約17℃であることから、今回得られた感温特性値の $Ea=86.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ を用いて両時期の発育速度の比をアレニウスの式から求めると

$$\frac{A \exp(-86800/8.314 \times (273.15 + 17))}{A \exp(-86800/8.314 \times (273.15 + 6))} \cong 4.13$$

となり、計算上は起算日前後は開花日前後の約1/4の速度で発育が進行していることとなる。これは、実際の花芽発育開始が起算日と4日ずれば開花予測日が1日弱、同じく2週間ずれば予測日が3日強とかなりずれることを意味する。毎年の気象の違いを考えれば2週間程度の起算日のずれは十分ありうることであろう。すなわち、予測精度向上のためには、起算日の設定を適切にすることが重要である。実際、ニホンナシにおいては、休眠覚醒モデルと花芽発育モデルを組み合わせ、休眠覚醒後に起算日を設定して開花日予測を行うことにより高精度で開花日を予測できることが報告されており(Sugiura・Honjo, 1997; 杉浦, 1997)、カンキツにおいても開花期予測精度向上のためには花芽分化の生理・生態的研究を通して花芽分化時期推定モデルを構築することが必要である。

温度反応特性の温度による影響については、今回の実験で10℃～25℃の範囲は転換点なしでアレニウスの式に従うことが確認されたが、これ以外の温度については不明である。当研究所内の平年値において平均気温が10℃以上となるのは3月中旬以降、最低気温が10℃以上となるのは4月中旬以降であり、一般的に用いられている起算日の1月から数ヶ月間は10℃以下の気温に遭遇する。このため、10℃以下の気温に対する温度反応特性が、10℃以下でも転換点や無効温度はないという現在の想定と異なれば予測の精度低下を引き起こすこととなる。実際、

岡田ら(1984)は、有効積算温度によるウンシュウミカンの開花日予測において8℃以下を無効温度とすると精度が高くなったと報告しており、無効温度の存在を示唆している。バレンシアオレンジでも果実成熟モデルにおいて12.8℃(55°F)以下を無効温度にした場合に適合度が最も高かったとの報告がある(Newmanら, 1967)。また、樹種および生態反応は異なるが、ニホンナシの自発休眠打破は6℃程度までは低温ほど効果が高いが0~6℃の範囲は効果に違いがないというように、10℃以下の温度反応に転換点があることが示されている(杉浦, 1997)。これについては、今後ウンシュウミカン等の花芽発育に関しても実験により明らかにする必要がある。この場合、今回の実験で発芽以降は最高気温が15℃以上でないと発育異常が発生することが明らかとなったことから、時期により処理温度を変えたり、変温処理を行うなどの工夫が必要である。そして、これらについて得られた知見を発育モデルに組み入れることにより、カンキツの開花日予測の精度向上を図ることができると判断される。

摘 要

1. ウンシュウミカン(‘興津早生’および‘大津四号’)の開花に至る感温特性について2月からの温度処理実験により検討した。
2. 10℃区および13℃区で新梢に発育異常が認められた。13℃区よりも平均気温が低い15/10℃区では発育異常はみられなかったことから、新梢の正常な発育には最高気温が15℃以上必要であると考えられる。
3. 開花までの温度反応は、温度が高くなるほど開花が早くなり、10~25℃の範囲でアレニウスの法則に適合した。この範囲には転換温度は認められないとともに、温度反応に発芽前と発芽後に違いは認められなかった。アレニウスの式における感温特性値(Ea)は $86.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ($20.8 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$)であった。この値は、ウンシュウミカンの品種および栽培地域によらず利用可能と考える。

引用文献

- 1) Bellows, T. S. and J. G. Morse. 1986. Modelling flower development in navel oranges. *Sci. Hort.* 30:117-126.
- 2) 林田誠剛・岸野 功・森田 昭. 1998. ウンシュウミカンの

の発育予測システムの開発. 長崎果樹試研報. 5:1-9.

- 3) 井上 宏. 1989. ウンシュウミカンの花芽の分化, 発達の温度条件. *園学雑.* 58:75-82.
- 4) Krajewski, A. J. and E. Rabe. 1995. Citrus flowering: A critical evaluation. *J. Hort. Sci.* 70:357-374.
- 5) Moss, G.I. 1969. Influence of temperature and photoperiod on flower induction and inflorescence development in sweet orange. *J. Hort. Sci.* 44:311-320.
- 6) Newman, J. E., Cooper, W. C., Reuther, W., Cahoon, G. A. and Peynado, A. 1967. Orange fruit maturity and net heat accumulations. *Ground Level Climatol. Am. Assoc. Adv. Sci. Publ.* 86:17-147.
- 7) 岡田正道・鈴木晴夫・牧田好高・大野文征・小中原 実. 1984. ウンシュウミカンの発芽期および開花期に及ぼす気象要因の影響. *静岡柑試研報.* 20:1-10.
- 8) 小野祐幸. 1997. 温度変換日数法によるウンシュウミカンの広域的開花予測. *園学九.* 5:39-40.
- 9) Ono, S., and T. Konno. 1999. Estimation of Flowering Date and Temperature Characteristics of Fruit Trees by DTS Method. *JARQ.* 33:105-108.
- 10) 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(第一報) 果樹の開花における感温特性. *園学要旨.* 昭62秋:72-73.
- 11) 小野祐幸・金野隆光・田村良文・岩垣 功・高原利雄・山田彬雄. 1988. 永年作物の感温特性に関する研究(第三報) カンキツの開花期予測. *園学要旨.* 昭63春:30-31.
- 12) 小野祐幸・薬師寺博・金野隆光. 1990. ウンシュウミカンの開花予測に関連する要因の地域による違いについて. *園学雑.* 59(別2):58-59.
- 13) 杉浦俊彦. 1997. ニホンナシの気象生態反応の解析と発育予測モデルの開発. 京都大学学位論文
- 14) Sugiura, T. and H. Honjo. 1997. A dynamic model for predicting the flowering date developed using an endodormancy break and a flower bud development model in Japanese pear. *J. Agr. Met.* 52:897-900.
- 15) 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.
- 16) 矢羽田二郎・大庭義材・桑原 実. 1995. 温度変換日数(DTS)法によるウンシュウミカンの満開期予測と精度. *福岡農総試研報.* 14:125-128.