

訪花昆虫導入時期決定のためのカキの開花始期予測方法

新川 猛・中島かすみ*・杉浦真由・鈴木哲也

Prediction method of persimmon flowering start time to determine the introduction time of polinator

Takeshi Niikawa, Kasumi Nakashima, Mayu Sugiura and Tetsuya Suzuki

要約：本県のカキ産地では、開花直前に訪花昆虫を放飼し、果実の種子形成を促すことで生産の安定化を図っている。しかし、近年の温暖化による気候変動幅の拡大に伴って、開花時期は変動し、適期に放飼できない場面も散見される。そこで、本研究ではカキの開花に及ぼす要因を解明するとともに、開花期を予測する方法について検討した。

カキの開花期は、発芽期や展葉期ならびに開花期までの気温と相関があるものの、それぞれの要因との単相関では予測精度に欠けた。そこで、重回帰分析を行ったところ展葉期と展葉期から開花始期までの積算気温の2変数を用いると高い精度で開花始期の予測ができることが明らかとなった。また、当年の開花始期の予測は、展葉期以降‘富有’で20日間、‘西村早生’で25日間の積算気温に基づいた予測式を用いることで、最大誤差3.5日以内で予測でき、巣箱導入のため少なくとも10日以上準備期間が確保できることが明らかとなった。

キーワード：重回帰分析、開花始期、カキ、精度、予測式

緒言

農業生産において、対象となる作物の生育ステージを把握することは極めて重要であり、生産性の向上や安定化はもとより流通・販売に至るまでその影響は多岐にわたる。篤農家と呼ばれる生産者は、経験や勘に基づく優れた農業生産技術を有しており¹⁾、作物の状態を的確に捉え、栽培管理においてより最適な生育環境を維持することができる。つまり、他者を圧倒する生産性には、高精度な予測と診断技術のスキルが根底にあるものと考えられるが、このほとんどが「暗黙知」であり、これらを「形式知」に変換することが必要である¹⁾。また、近年の温暖化ならびに気候変動幅の拡大によって、気象要因や生育ステージにおいて観測史上初といったこれまでの経験が通用しない場面が増加する傾向にある。

カキ産地では、種子数の増加による結実安定化²⁾や不完全甘ガキである‘西村早生’の甘果率向上を目的にして開花期にミツバチの放飼を行い、巣箱設置期間中は除草剤散布も含め地域全体で防除を行わないこととなっている。巣箱の設置は概ね3週間ほどの期間にわ

たるが、巣箱設置の直前は難防除害虫であるフジコナカイガラムシの越冬幼虫が新芽に移動する防除適期³⁾であるため、ミツバチの放飼は防除期間を確保するために、開花期の直前に行う必要がある。現地の指導機関では、開花の半月前には開花前の最終防除日と巣箱設置日を地域全体に周知しているが、カキの開花期を予測する客観的な手法は確立されておらず、これまでの経験に基づいているため、巣箱設置前に開花が始まってしまう年も散見される。

植物の発育ステージの予測は、ソメイヨシノの開花予測に用いられている温度変換日数法^{4,5)}などの発育速度(DVR: Development Rate)モデル⁶⁾精度が高いことが明らかとなっている。実際イネの出穂期⁷⁾や日本ナシの開花期⁸⁾、収穫期⁹⁾などは、数日程度の誤差で予測可能であり生産現場で活用されている。しかしこの方法は、多項式を用いた複雑な計算式からなり、専用解析プログラムの作成や大量の気温データの入力を要するなど煩雑な作業も必要である。また、カキでは開花予測プログラムとして‘会津身不知’¹⁰⁾の事例があるが、本県とは適応品種、気候とも大きく異なっている。本研究ではミツバチの巣箱を最適な時期に導入するため、重回帰分析に

* 揖斐農林事務所 (現在：岐阜県農産園芸課)

より、本県のカキ品種‘西村早生’ならびに‘富有’の開花期に影響する気象要因を特定するとともに、カキの開花始期を少ないパラメーター数でより早い段階で±3.5日以内で予測できる予測式を確立して、生産現場での利用方法についての検証を行った。

材料および方法

1. 供試パラメーター

生育データは、農業技術センター植栽の‘富有’ならびに‘西村早生’の基準樹各2樹に対して行っている生育調査結果から展葉期と開花期を用いた。展葉期ならびに開花期については、育成系統適応性検定試験・特性検定試験調査基準（農研機構果樹研究所監修）に準じて日付として示した。気象データは、アメダス岐阜（岐阜市加納二の丸6）の3～5月の月別平均気温、最高気温、積算気温の気象観測値を用いた。また、年度ごとに展葉期から開花始期までの期間の平均気温、積算気温を算出した。積算気温は、日平均気温の和として算出した。対象年度は1980～2019年の40年間とした。

2. 解析方法

開花始期と各パラメーター間の単相関を求め、相関係数について無相関の検定を行った。また、開花始期を目的変数とする重回帰分析を実施した。重回帰分析は、各パラメーター間でMulticollinearity（多重共線性）を持つパラメーターが存在した場合は、そのいずれか一方を

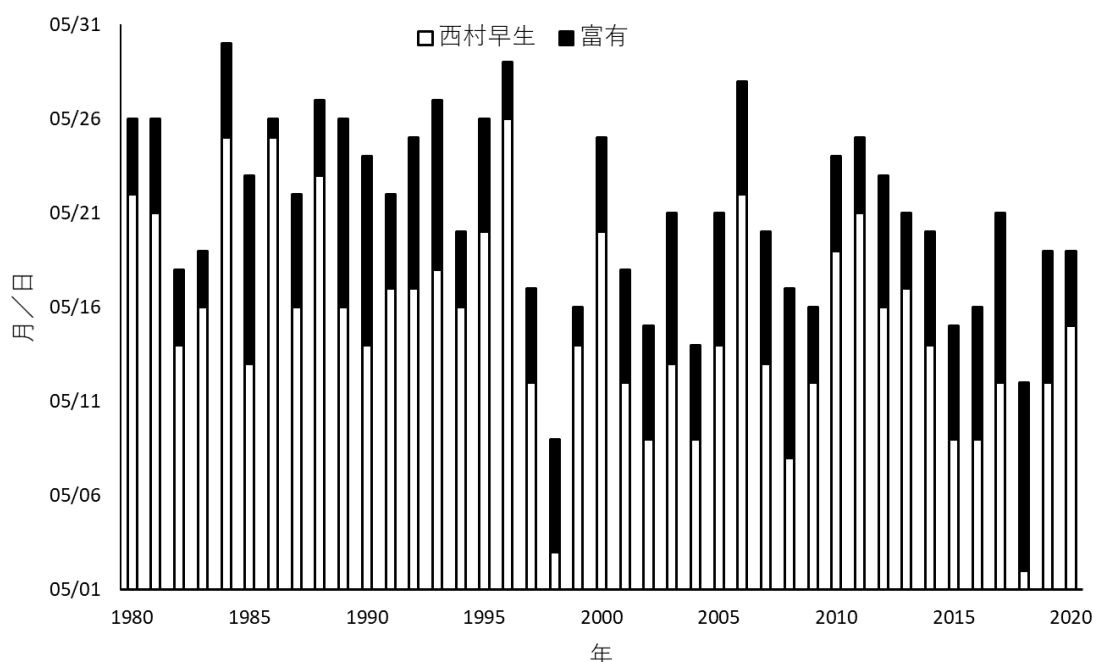
除外した上で、P値の絶対値を0.2とした増減法（ステップワイズ法）により、エクセル統計2018（株式会社社会情報サービス）を用いて行った。

3. 予測式の精度の向上

重回帰分析によって得られた予測式の精度について、RMSE（二乗平均平方根誤差）ならびに修正済み決定係数により精度の評価を行った。また、有意水準を0.01としてSmirnov-Grubbsの両側検定により外れ値検定を行った。さらに、解析対象年数について、全期間（40年間）と昨今の状況に合致する直近20年（2000～2019年）とした場合の精度の検証を行った。

4. 当年度の開花始期予測の妥当性の検証

得られた開花予測式は、平年値を用いて開花始期を予測するものであり、当年度の予測については、平年値を当該年度の観測データに置き換えていくことによって、精度が向上していく性質のものである。現地においては、当該年度の開花期特に開花始期については、なるべく早い段階でより正確な情報が求められることから、展葉後5～25日間の5日刻みの積算気温を用いて予測式を求め、各予測式のRMSE、修正済み決定係数などを用いて、精度の検証を行った。また、当該年度のパラメーターを適用したシミュレーションを行い、実際の開花始期との誤差の検証を行った。



第1図 カキ‘富有’と‘西村早生’の40年間（1980～2019年）の開花始期の変化

第1表 カキ‘富有’の生育ステージの変化

年(期間)	発芽期	展葉期	開花期			収穫期			落葉期
			始期	盛期	終期	始期	盛期	終期	
2000～2019	03/21	04/10	05/19	05/21	05/24	11/07	11/19	11/30	12/01
1980～1999	03/29	04/17	05/22	05/25	05/28	11/03	11/17	11/28	11/28
有意性 ^z	**	***	*	**	*	*	n.s.	n.s.	**

^z*, **, ***およびn.s. は、t検定によりそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意であること、n.s.は有意でないことを示す

第2表 カキ‘西村早生’の生育ステージの変化

年(期間)	発芽期	展葉期	開花期			収穫期			落葉期
			始期	盛期	終期	始期	盛期	終期	
2000～2016	03/20	04/07	05/13	05/16	05/19	09/26	09/28	09/30	11/24
1980～1999	03/23	04/12	05/17	05/21	05/23	09/22	09/30	10/06	11/22
有意性 ^z	n.s.	**	*	**	**	*	n.s.	**	n.s.

^z*, **, ***およびn.s. は、t検定によりそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意であること、n.s.は有意でないことを示す

第3表 1980～2019年の40年間の開花始期と生育および気象要因との単相関とその精度

生育・気象 要因	富有			西村早生		
	相関係数	有意性	RMSE ^z	相関係数	有意性	RMSE
発芽日	0.522	***	4.15	0.532	***	4.66
展葉日	0.714	***	3.41	0.774	***	3.48
3月平均気温	-0.670	***	3.61	-0.712	***	3.87
4月平均気温	-0.828	***	2.73	-0.837	***	3.02
5月平均気温	-0.714	***	3.41	-0.658	***	4.15
3月最高気温	-0.720	***	3.37	-0.743	***	3.68
4月最高気温	-0.767	***	3.12	-0.779	***	3.45
5月最高気温	-0.627	***	3.79	-0.565	***	4.54

^z二乗平均平方根誤差 (RMSE: root mean squared error)

結果および考察

果樹における温暖化の影響は、開花期と成熟期がともに前進する果実生育期前進タイプと、開花期が前進する一方で成熟期は前進しない果実生育期延長タイプの2タイプに大別でき、カキは後者である¹¹⁾。当センター基準樹における過去40年間の開花始期は、‘富有’では最速が5月9日、最遅が5月30日、‘西村早生’では同5月2日と5月26日であり、年度によって3週間以上の生育差が認められる(第1図)。過去40年間を前半の20年間(1980～1999年)と後半の20年間(2000～2019年)に分けた場合の生育ステージの変化は、両品種とも展葉期ならびに開花期が有意に早まっており、生育の前進化が認められる(第1表、第2表)。収穫期については‘富有’で遅れるもしくは差が認められず、‘西村早生’では収穫始期が遅くなり、収穫盛期に差はなく、収穫終期は

前進化している。なお、‘西村早生’の収穫期については、昨今樹全体の着果量が減少しており、収穫始期に一斉収穫を行う頻度が高くなっていることから、収穫始期以外には適切な時期を反映できていないと考えられる。

カキの開花の早晩は、開花前とくに直前10～15日間の気温に強く影響されるようで、この期間が暖かいと促進され、発芽時期の早晩とはあまり関係しない¹²⁾。一方、開花始期と発芽期・展葉期および開花までの期間の平均気温ならびに最高気温との単相関には、 $p < 0.001$ の有意な相関が認められたことから(第3表)、特定の時期以外でも高温で推移することによる開花期への影響はあるものと考えられた。開花始期と4月の平均気温との相関係数が-0.83と最も高かったが、この回帰式の二乗平均平方根誤差(RMSE)は3前後で、最大誤差は約7日(データ略)と実用的な予測に用いるには精度に欠ける結果であった。

単相関では誤差が大きく必要とする精度に達しなかったことから、次に重回帰分析を検討した。重回帰分析は、説明変数が多くなるほど決定係数が高くなる傾向があるとともに、必要となるデータ数が増大し煩雑となる。気温については、3~5月のいずれの月も有意な相関であったことから、気温データは、発芽期および展葉期を起点として開花始期までの期間の積算気温を算出して解析に用いた。その結果、‘富有’ および ‘西村早生’ とも展葉期および展葉期から開花始期までの積算温度の2変数が選択され、‘富有’ では、修正済み決定係数が0.904、RMSEが1.47、‘西村早生’ では、修正済み決定係数が0.934、RMSEが1.37で、単相関と比べて精度は向上した（第4表）。今回使用した生育データは、過去40年間の発芽期と展葉期のデータであるが、発芽期については、りん片がゆるみ緑色の部分が見え始める時期、展葉期については、結果母枝の先端の2~3芽の第1葉が樹全体の20~30%展葉した時期と定義されている。時期の判定には、展葉期より発芽期で調査者の主観に左右される余地が大きくデータの振れが生じやすいことから、展葉期が選択されたものと思われる。

次に得られた予測式についての精度の向上を検討した。40年間の調査では、複数の調査担当者が存在するた

め、主観の差異がデータの精度に関与する。精度を向上させるためには、人的変動要因を客観的に排除する必要があるため、選択された2変数に対して、有意水準0.01とした外れ値検定によりデータクリーニングを行った。その結果、1994年の‘富有’のデータについては、外れ値と判定された（データ略）ので、以後この年のデータを除外した。

予測は、まだ存在しない値を用いるため予測式の確立に用いたデータの範囲から大きく離れた値があると精度が保証されないことから¹³⁾、40年間の幅広いデータを用いた方が良い場合がある一方、重回帰分析ではサンプルサイズが大きくなるとp値が小さくなる性質があり、サンプルサイズとしてはパラメーター数の10倍程度が良いとされている¹⁴⁾。近年、生育が前進化（第1、2表）しているとともに今後更なる気温上昇が予測されているため¹⁵⁾、予測に用いるデータセットとして直近20年分を用いるのが相応しいのではないかと考えられる。そこで、対象年数を変えて予測式を求め、その精度を修正済み決定係数、AIC（赤池情報量規準）、RMSE、誤差日数で評価したところ、両品種ともにいずれの指標についても2000~2019年の20年間のデータを用いた予測式が最も精度が高かった（第5表）。

第4表 開花始期を目的変数とし40年間（1980~2019年）の観測データを用いた重回帰分析結果

品種	説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	偏回帰係数の有意性の検定			
				F値	t値	P値	判定
富有	展葉期	0.9284	1.1437	363.6	19.07	<0.001	**
	展葉日から開花始期までの積算気温	0.0741	0.7642	162.3	12.74	<0.001	**
	定数項	-4.2509		0.3	-0.54	0.596	
西村早生	展葉期	0.8989	0.9089	461.5	21.48	<0.001	**
	展葉日から開花始期までの積算気温	0.0731	0.5967	198.9	14.10	<0.001	**
	定数項	1.6367		0.1	0.28	0.779	

第5表 対象年数を異にした開花始期予測式の精度

品種	対象年	修正済み決定係数	AIC ¹⁾	RMSE	平均誤差（日）	最大誤差（日）
富有	2000~2019	0.9321	6.3	0.71	0.8	2.1
	1990~2019 ²⁾	0.9227	21.7	1.12	0.9	3.3
	1980~2019 ²⁾	0.9307	24.1	1.25	0.9	3.3
西村早生	2000~2019	0.9636	0.7	0.62	0.7	2.1
	1990~2019	0.9288	24.1	1.17	1.0	2.8
	1980~2019	0.9338	31.8	1.38	1.1	3.2

²⁾ 1994年を除く

¹⁾ 赤池情報量規準（Akaike's Information Criterion）

第6表 展葉日と展葉後の積算気温からのカキ'富有'の開花始期予測式とその精度

予測式	修正済み決定係数	RMSE	平均誤差 (日)	最大誤差 (日)
$(\text{開花始期日}^2) = 0.675 \times (\text{展葉日}^2) - 0.146 \times (\text{展葉から5日間の積算気温}) + 82.789$	0.686	2.17	1.6	4.8
$(\text{開花始期日}) = 0.756 \times (\text{展葉日}) - 0.123 \times (\text{展葉から10日間の積算気温}) + 81.860$	0.813	1.68	1.3	4.7
$(\text{開花始期日}) = 0.792 \times (\text{展葉日}) - 0.097 \times (\text{展葉から15日間の積算気温}) + 82.251$	0.804	1.72	1.2	4.6
$(\text{開花始期日}) = 0.871 \times (\text{展葉日}) - 0.090 \times (\text{展葉から20日間の積算気温}) + 79.913$	0.827	1.61	1.3	3.4
$(\text{開花始期日}) = 0.911 \times (\text{展葉日}) - 0.091 \times (\text{展葉から25日間の積算気温}) + 84.631$	0.858	1.46	1.2	3.7
$(\text{開花始期日}) = 0.904 \times (\text{展葉日}) - 0.087 \times (\text{展葉から30日間の積算気温}) + 91.536$	0.885	1.32	1.0	3.7

²1月1日からの経過日数

第7表 展葉日と展葉後の積算気温からのカキ'西村早生'の開花始期予測式とその精度

予測式	修正済み決定係数	RMSE	平均誤差 (日)	最大誤差 (日)
$(\text{開花始期日}^2) = 0.731 \times (\text{展葉日}^2) - 0.152 \times (\text{展葉から5日間の積算気温}) + 73.279$	0.560	3.04	2.3	7.3
$(\text{開花始期日}) = 0.745 \times (\text{展葉日}) - 0.157 \times (\text{展葉から10日間の積算気温}) + 83.589$	0.742	2.33	1.9	4.4
$(\text{開花始期日}) = 0.834 \times (\text{展葉日}) - 0.119 \times (\text{展葉から15日間の積算気温}) + 78.501$	0.743	2.33	1.9	5.2
$(\text{開花始期日}) = 0.944 \times (\text{展葉日}) - 0.112 \times (\text{展葉から20日間の積算気温}) + 75.104$	0.831	1.89	1.5	4.1
$(\text{開花始期日}) = 1.010 \times (\text{展葉日}) - 0.117 \times (\text{展葉から25日間の積算気温}) + 80.189$	0.887	1.55	1.3	3.0
$(\text{開花始期日}) = 1.056 \times (\text{展葉日}) - 0.123 \times (\text{展葉から30日間の積算気温}) + 88.923$	0.943	1.10	0.9	1.9

²1月1日からの経過日数

第5表の予測式は、説明変数として展葉期から開花始期までの積算気温を使用しており、この気温は開花日まで確定しない。本予測の目的は、できるだけ早期に当年の開花日を予測する必要があるため、展葉期から予測日までの観測値を用いて積算気温を算出し開花始期の予測を行う必要がある。精度の点からは、開花日に近い方がより観測値が多く有利であるが、予測時期は遅くなるため、一定の妥協点を見出す必要がある。現地の指導機関では、防除日は土日を含んだ数日間を指定していることから、誤差としては、3.5日未満が目安となる。展葉日から5日刻みの積算気温を用いた予測式で、最大誤差日数が3.5日未満となったのは、「富有」では展葉から20日間、「西村早生」では同25および30日間の積算温度を用いた場合であった(第6, 7表)。そこで、「富有」では20日間、「西村早生」では25日間の予測式を用いて、2020年の観測値による開花始期を算出したところ、「富有」の予測日は5月19日、観測日は5月19日と誤差なし、「西村早生」の予測日は5月13日、観測日は5月15日と誤差2日であった(データ略)。また、この予測を実施する日は4月24日で開花の20日以上前であった。展葉から開花始期までの平均日数は、「富有」で38日、「西村早生」で36日間であることから、養蜂業者との調整や巣箱の設置については、少なくとも10日間程度の準備期間が確保できる。昨今、気候変動幅が拡大し、展葉期から開花期に真夏日が観測される¹⁶⁾場面が散見される。このような気象条件が続く際には、早期高温情報などが発表され年平均値よりかなり高い気温で数日間推移するため、精度の低下要因となるが開花始期に

及ぼす影響は1～2日程度と許容範囲内であった。

謝辞

本研究報告のデータについては、歴代果樹担当者が1980年以降続けてきた生育調査データを用いた。ここに記し、深く謝意を表す。

引用文献

- 1) 後藤一寿(2014). ウェアラブルカメラを活用した篤農家技術の映像化による技術伝承研究の提案. 生物工学. 92(7) : 347-349.
- 2) 深江義忠・濱地文雄・森田 彰・姫野周二・野口義之・辻川義寿(1988). 果樹園におけるミツバチの放飼技術 第2報 カキ園における放飼効果. 福岡農総研研報. C-7 : 61-66.
- 3) 青野光男・宮下裕司・金崎秀司・大西論平(2009). カキのフジコナカイガラムシの発生増加の原因と防除方法に関する研究. 愛媛農水研果樹セ研報. 1:65-76.
- 4) 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.
- 5) 青野靖之・小元敬男(1990). 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.
- 6) De Wit, C. T., R. Brouwer and F. W. T. Penning de Vries (1970). The simulation of photosynthetic systems. Proc. of the IBP/PP Technical Meeting, PUDOC, Wageningen : 47-60.
- 7) 川方俊和・岡田益己(1989). 発育指数を用いた水稻の

- 幼穂形成始期と出穂期の推定. 農業気象. 45 : 137-142.
- 8) 大谷義夫(2006). 気象生態反応に基づくニホンナシの開花予測. 栃木農試研報. 58 : 7-16.
- 9) 大谷義夫. 気象生態反応に基づくニホンナシの収穫期, 果実肥大, 果実生理障害予測. 栃木農試研報. 58 : 17-29.
- 10) 永山宏一・桑名 篤・野上紀恵(2006). ノンパラメトリック回帰法によるブドウ '巨峰' およびカキ '会津身不知' の開花予測法. 東北農業研究. 59 : 171-172.
- 11) 杉浦俊彦・黒田治之・杉浦裕義(2007). 温暖化がわが国の果樹生育に及ぼしている影響の現状. 園学雑. 6 : 257-263.
- 12) 松本善守(2000). 開花の早晚と果実肥大. p183-184 農文協編. 果樹園芸大百科 6 カキ. 農山漁村文化協会. 東京.
- 13) 加藤博和 (2009) . LCA を支える理論と手法—Part 10 統計学の基礎知識. Journal of Life Cycle Assessment. 5 : 555—561.
- 14) Peter, P., J. Concato, A. R. Feinstein and T. R. Holford. 1995. Importance of events per independent variable in proportional hazards regression analysis II . Accuracy and precision of regression estimates. Journal of Clinical Epidemiology. 48:1503-1510.
- 15) 気象庁. 2017. 地球温暖化予測情報 第9巻. <<http://https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol9/index.html>>.
- 16) 気象庁HP. 過去の気象観測データ 観測史上1~10位の値 (4月としての値) <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rank_s.php?prec_no=52&block_no=47632&year=&month=4&day=&view=h0>.

Abstract

In the persimmon production area, pollinators are released during the flowering time in order to stabilize production by promoting seed formation in the fruit. However, due to the

widening climate change caused by global warming in recent years, the flowering time fluctuates greatly, and there are increasing cases where it cannot be released in a timely. In this study, we clarified the factors that influence the flowering time of persimmons. Then, we examined the method of predicting the flowering time from the factors.

The flowering time of persimmon was significantly correlated with the germination time, leafing time and spring temperature. However, the accuracy was insufficient in the simple correlation with each factor. In the multiple correlation, it was clarified that the flowering start time can be predicted with high accuracy by using the two variables of the leafing time and the integrated temperature from the leafing time to the flowering start time. The prediction of the flowering start time in the current year could be made within a maximum error of 3.5 days by using a prediction formula based on the accumulated temperature for 20 days for "Fuyu" and 25 days for "Nishimurawase" after the leafing time. As a result, a preparation period of at least 10 days can be secured for the introduction of pollinator.

Key words

accuracy, flowering start time, persimmon, prediction formula, multiple regression analysis