

気象予報を活用したニホンナシ「幸水」開花予測の精度向上

金子夏樹・押田正義・萱場互起*1・山田隆徳*2

キーワード：ニホンナシ，開花予測，温暖化，気象予報

I 緒 言

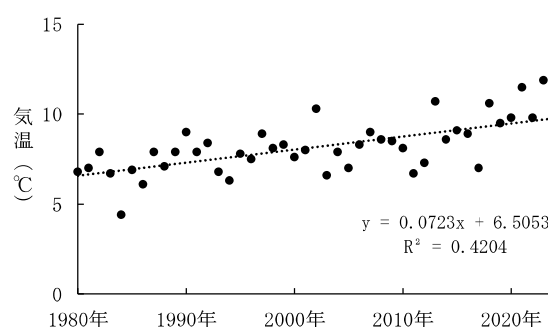
ニホンナシは、落葉果樹の中でも気候に対する適応性が広く、東北地方から九州地方まで栽培されている。一方で、近年、地球温暖化による気温上昇に伴い、ニホンナシの開花期は12都道府県で前進していることが報告されている（杉浦ら，2007）。千葉県においても気温上昇やそれに伴う主力品種「幸水」の満開日の変動が生じている（戸谷・川瀬，2011）。さらに、文部科学省及び気象庁（2020）は、21世紀末の気温は20世紀末と比較して1.8℃～5.0℃上昇すると報告している。そのため、ニホンナシの開花期の変動は今後も継続する可能性が高いと考えられる。

春は花芽整理や受粉、摘果など、高品質な果実生産に向けて多くの労力を要する作業が集中する繁忙期に当たる。これらの作業適期は非常に短く、開花期が変動することによって、人工受粉用花粉調達や受粉などの段取り、花芽整理、摘果、農薬散布、多目的防災網の展張などの作業時期も変動し、生産者は雇用の確保や作業計画の立案が困難になる。これらのことから、産地では開花期を早期に把握し、余裕を持った作業計画の立案ができることが望まれる。

こうした中で、栃木県や長崎県、神奈川県では、生育予測モデルに基づいた開花予測システムが実用化されている（杉浦・本條 1997；大谷，2006；田中・林田 2008；曾根田，2022）。千葉県においても、杉浦・本條（1997）のモデルを活用して、これまでにMicrosoft Excelのマクロ機能等を用いたナシの開花予測システムを開発し無料で提供している（戸谷・川瀬，2013）。この開花予測システムでは生育予測モデルの他発休眠期の発育指数（DVI2）を各産地に近いアメダスの過去の実測の気温データに基づいて決定し、実際の開花日とのRMSE（平均二乗誤差）が3日以内の産地について予測可能としている（戸谷・川瀬，2011，戸谷・川瀬，2013）。しかし、本システムは2009年までの気温データから作成されており、開発から年月が経っていることから誤差が生じている可能性が懸

念される。そこで本研究では、開花予測システムの基本となる他発休眠期の発育指数（以下、DVI2）を、近年のデータを加えて再計算し、その精度を検証した。

また、近年は他発休眠期に当たる3月の月平均気温が高くなっており（第1図）、平年値を用いて開花予測を行うと十分な予測精度を得られないことがある。3月の高温によって実測の開花日が予測より前進した場合、受粉作業等の準備が遅れるなど産地への影響は大きい。従来のシステムでも天気予報や近年の気温の傾向から使用者の判断で平年より気温が高い場合の予測も行うことができたが、客観的な判断に基づく予測ではなかった。そこで、本研究では気象庁が提供する2週間気温予報値や季節予報を活用することによる開花予測の精度向上の効果を検証したので報告する。



第1図 3月の月平均気温の推移（アメダス佐倉）

II 材料及び方法

1. 生育予測モデルの精度検証（実験1）

2013年に千葉県で開発された「幸水」のナシ開花予測システムは1980～2009年の期間を分析した結果に基づいており、近年の温暖化の影響が反映されていない。そこで1980～2021年の開花期のデータ及び調査地点に近いアメダス佐倉の気温データを追加して開花始及び開花盛までに要する他発休眠期のDVI2（杉浦，1997）を算出した。

千葉県農林総合研究センター（以下、農林総研）内栽植の「幸水」生育調査樹1樹の開花データを用いて検証を行った。「幸水」の生育調査は、1969年に7年生の樹を用いて開始し、1999年に14年生の樹に変更し、2020年に15年生の樹に変更した（樹はいずれも同一圃場内栽植）。供試した開花期のデータは1980～2021年の開花始（連続開花の初日）及び満開日（70～80%開花）とした。他発休眠期

2024年9月4日受領 (Received September 4, 2024)

2024年12月24日登載決定 (Accepted December 24, 2024)

*1 気象庁（現在は沖縄気象台）

*2 銚子地方気象台

のDVI2は杉浦（1997）に基づいて以下のように求めた。まず、自発休眠期における発育指数（DVI1）について、1時間ごとのアメダスの気温データを用いて算出した発育速度（DVR1）を積算して、DVI1=2.2に達した日を自発休眠覚醒日とした。この自発休眠覚醒日を起点として開花始までに要した発育指数（DVI2）を、同様に1時間ごとのアメダス気温データから算出した他発休眠期の発育速度（DVR2）を積算して求めた。

DVR1, DVR2の算出は杉浦（1997）の報告にある以下の式とした。

DVR1は、

$t \leq 6$ のとき

$$DVR1 = 1.333 \cdot 10^{-3}$$

$6 < t \leq 9$ のとき

$$DVR1 = 2.276 \cdot 10^{-3} - 1.571 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

$9 < t \leq 12$ のとき

$$DVR1 = 3.448 \cdot 10^{-3} - 2.874 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

$12 < t$ のとき

$$DVR1 = 0$$

DVR2は、

$t \leq 20$ のとき

$$DVR2 = 2.078 \cdot 10^{15} \exp\{-12094(t+273)^{-1}\}$$

$20 < t$ のとき

$$DVR2 = 338.2 \exp\{-3474(t+273)^{-1}\}$$

これを開花予測システムに反映させて、1980～2021年の開花始の予測日と実測日を回帰分析して決定係数及び二乗平均平方根誤差（以下、RMSE）を算出した。

RMSEの算出は以下の式とした。

$$RMSE = \sqrt{(X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2)/n} \quad X \text{は当年度の実測日と予測日の誤差を示す。}$$

また、同様の方法を用いて、生育調査事業を実施している「幸水」産地9地点（市川市、印西市、市原市、木更津市（内陸）、一宮町、館山市、柏市、いすみ市、香取市）において聞き取りをした1993～2022年の開花始の予測日と実測日を回帰分析して、以前の結果（1980～2009年）と精度を比較した。なお、これまで予測を行っていなかった3地点（柏市、いすみ市、香取市）については回帰分析のみ行った。気温データは、市川市及び柏市がアメダス船橋、印西市及び香取市がアメダス佐倉、市原市がアメダス木更津、木更津市（内陸）がアメダス牛久、館山市がアメダス館山、いすみ市及び一宮町がアメダス茂原をそれぞれ用いた。各地の予測には戸谷・川瀬（2013）と同様に調査地点に近いアメダスデータを用いたが、以前の結果で予測精度が低かった一宮町についてはアメダス勝浦からアメダス茂原に変更した。

2. 2週間予報を用いた「幸水」開花始の予測精度の検証（実験2）

開花予測の方法として、気象庁が発表する2週間気温予報の気象データ利用が予測精度に及ぼす影響を検証した。開花始の実測日は実験1と同じ農林総研内「幸水」生育調査樹の1991～2020年のデータを、各年のDVI2の値は実験1で求めた1980～2021年のデータを用いた。例年の開花始の2～3週間前に当たる3月16日に各年の2週間気温予報のデータをDVR2計算式に当てはめ、DVI2の値となった日を予測日として平年値（30年平均）を用いた予測との回帰分析をした。分析には気象庁の確率予測資料提供ページ（https://www.data.jma.go.jp/risk/probability/guidance/csv_k2w.php?n=20）からダウンロードした2週間予報の再予報データ（日本気象学会，2012）を3月16～30日の気温とするものと、平年値とするものの2通りの予測値を求めた。これらをそれぞれ実測値と回帰分析して決定係数及び予測誤差（RMSE）を算出して精度を比較した。また、2週間予報は平年値との気温の差が生じる確率を $-10 \sim 10^\circ\text{C}$ の範囲で算出し、 -10°C からの累積確率50%の値を予報値（アンサンブル平均（https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kisetsu_riyou/method/ensemble.html））として発表しているが、累積確率70%の値を予報値として用いた場合についても検証した。さらに、3月の平均気温が高温傾向にあった直近の10年間（2011～2020年）のみについて、上記の3方法で予測精度を検証した。いずれの予測についても3月31日以降の気温は平年値を用いた。

3. 1か月予報を用いた「幸水」開花始の予測精度の検証（実験3）

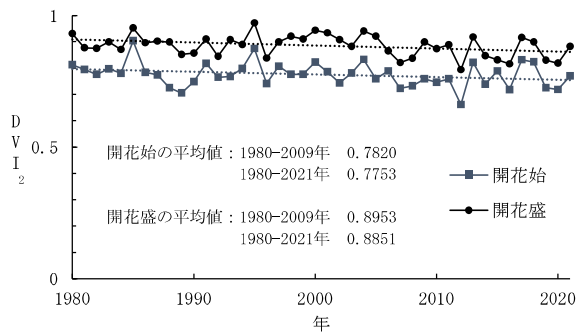
実験2よりさらに早い時期に1か月予報を用いた開花始の予測精度を検証した。対象樹は実験2と同じ樹の1991～2020年のデータとし、うるう年の予測は3月1日、平年は3月2日を起点日とした。予測には気象庁ホームページからダウンロードした1か月予報値の再予報データを用い、うるう年は3月2～29日の28日間、平年は3月3～30日の28日間の気温として開花始の予測を行い、平年値を用いた予測との精度を比較した。また、累積確率70%の値を予報値として用いた場合についても検証した。さらに、直近の10年間（2011～2020年）について、上記の3方法で予測精度を検証した。いずれの予測についても3月29日又は30日以降の気温は平年値を用いた。

III 結果及び考察

1. 生育予測モデルの精度検証（実験1）

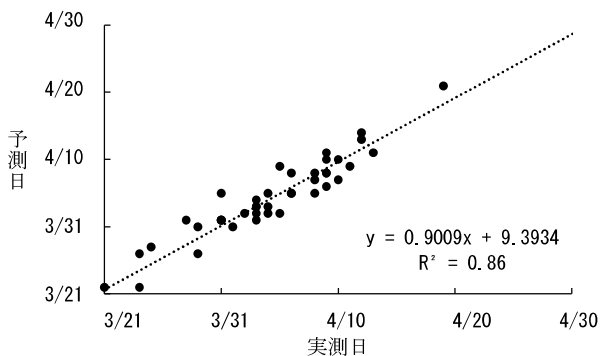
農林総研「幸水」の開花始及び開花盛までに要するDVI2の年次変動を第2図に示した。開花始までに要するDVI2は1980～2009年が0.7820、1980～2021年が0.7753と差は小さかった。同様に開花盛も1980～2009年が0.8953、1980～2021年が0.8851と差は小さかった。さらに回帰直線から過去40年間でわずかに低下する傾向があったが、概ね同

程度に推移しているものと考えられた。



第2図 千葉県農林総合研究センター内圃場の「幸水」の開花に要する発育指数（DVI2）の年次変動

新たに算出したDVI2を用いて算出した各年度の開花始の予測日と実測日との関係を第3図に示した。決定係数は0.89と高く、RMSEは2.1日と小さくなった。杉浦（1997）は、実測日の調査は目視で行うため1.2日の測定誤差が考えられ、推定日と実測日の誤差が3日程度であればその地点の予測精度は実用の範囲内としている。このことから、新しく生育データを追加したモデルについても実用性は高いと考えられた。



第3図 実測の気温から算出された千葉県農林総合研究センター内圃場の「幸水」開花始の予測日と実測日の関係

注）RMSEは実測日と予測日との差を平均二乗誤差（ $X = \sqrt{(X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2)/n}$ ）として算出した。

各産地においてもDVI2は以前と概ね同程度であると考えられた（第1表）。RMSEは、市川市、印西市、市原市、木更津市（内陸）の4地点のいずれも従来の値と同程度になった。一宮町はRMSEが3.2日と、実用の範囲内の誤差とされる3日と同程度になった。戸谷ら（2013）は一宮町において予測精度が低くなったことを指摘しているが、今回の試験ではアメダス地点を勝浦から茂原に変更したことで精度の向上が見られた。また、従来予測式のなかった3地点（柏市、いすみ市、香取市）のRMSEは2.2～2.6日で、いずれも実用可能な範囲内と考えられた。一方で、館山市はRMSEが4.8日と他の地点と比べて大きかった。戸谷・川瀬（2013）は高温に伴う自発休眠期の遅延を予測精度の低下の原因として指摘しており、引き続き検討が必要である。

第1表 千葉県内産地の「幸水」発育指数及び開花始の予測日と実測日の関係

調査地点	使用したアメダス地点	発育指数（DVI ₂ ）		RMSE（日）	
		従来	新たに算出	従来	新たに算出
千葉市（農林総研）	佐倉	0.79	0.78	2.5	2.1
市川市	船橋	0.83	0.79	2.0	2.5
印西市	佐倉	0.89	0.86	2.9	3.1
市原市	木更津	0.83	0.80	2.5	3.0
木更津市（内陸）	牛久	0.86	0.86	3.0	3.2
一宮町	茂原	0.78	0.88	5.4	3.2
館山市	館山	0.78	0.74	7.0	4.8
柏市	船橋	—	0.81	—	2.5
いすみ市	茂原	—	0.86	—	2.6
香取市	佐倉	—	0.88	—	2.2

注）RMSEは実測日と予測日との差を平均二乗誤差（ $X = \sqrt{(X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2)/n}$ ）として算出した。

2. 2週間予報を用いた「幸水」開花始の予測精度の検証（実験2）

3月16日以降の気温を平年値として3月15日に開花始を予測した場合、決定係数は0.57、RMSEは4.0日であった（第2表）。一方で、3月16～30日の気温を2週間予報値（アンサンブル平均）とした場合、決定係数は0.67、RMSEは3.7日であり、平年値を用いた場合と比べて予測精度は向上した。さらに、2週間予報値（累積確率70%）を用いた場合、決定係数は0.70、RMSEは2.8日で、試行した3方法

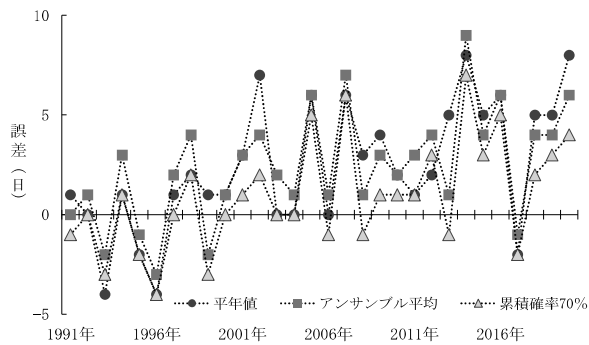
第2表 気象庁発表の2週間予報を活用した「幸水」開花始の予測精度

気温予測	1991～2020年		2011～2020年	
	決定係数	RMSE（日）	決定係数	RMSE（日）
平年値	0.57	4.0	0.68	5.2
2週間気温予報値（アンサンブル平均）	0.67	3.7	0.75	4.8
2週間気温予報値（累積確率70%）	0.70	2.8	0.77	3.6

注1）開花始の決定係数は、予測日と実測日を回帰分析して算出した。

2）RMSEは実測日と予測日との差を平均二乗誤差（ $X = \sqrt{(X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2)/n}$ ）として算出した。

の中で最も予測精度が高くなった。ただし、他発休眠期に当たる3月が高温傾向にあった（第1図）2011～2020年の開花始の予測精度はやや低くなったため、予測方法の更なる改善が必要と考えられる。この期間について、ナシ開花予測システムから算出された予測日は、実測より遅れる傾向にあった。予測日が実測日より早まった年が1回であったのに対して、予測日が実測日より遅れた年は9回あった（第4図）。他発休眠期に当たる3月以降の気温が1℃上昇すると、杉浦・本篠（1997）の生育モデルは開花が3～4日早まると推察されている。本試験でも同様の傾向が示されたことから、予報より高い気温によって開花期が前進した場合は予測精度が低下すると考えられた。



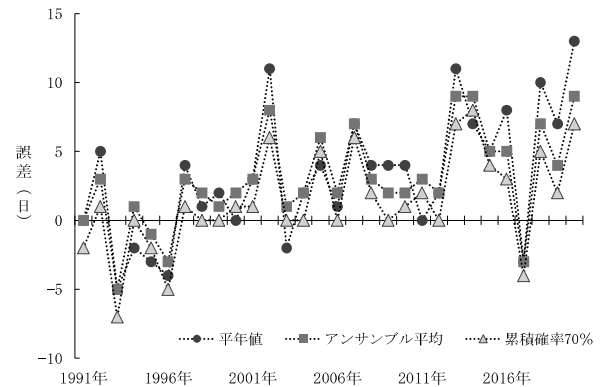
第4図 気象庁発表の2週間予報を活用した「幸水」開花始の予測日と実測日の誤差

注) 誤差は、各方法について予測日と実測日の差を算出した結果で、正の数であれば実測日の方が早く、負の数であれば予測日の方が早いことを示す。

3. 1か月予報を用いた「幸水」開花始の予測精度の検証（実験3）

3月の気温を平年値として開花始の予測した場合、決定係数は0.09、RMSEは5.6日で予測精度は極めて低くなった（第3表）。これは、近年3月の気温が平年より高く推移したためであり（第1図）、予測に平年値を用いることは難しいことが示唆された。3月の気温を1か月予報値（アンサンブル平均）とした場合、決定係数は0.50、RMSEは4.6日で平年値を用いた場合と比べて予測精度は向上し

た。さらに、1か月予報値（累積確率70%）とした場合、決定係数は0.48、RMSEは3.8日で、試行した3方法の中で最も予測精度が高くなった。実験2と同様に、3月が高温傾向にあった2011～2020年の予測精度はやや低くなったため、予測の更なる改善が必要である（第5図）。例えば、本試験では予測日から28日間のいずれの期間についても7日間平均及び14日間平均の予報値を予測に用いたが、2週間予報で発表されている5日平均の予報値を組み合わせることで予測精度が改善される可能性がある。



第5図 気象庁発表の1か月予報を活用した「幸水」開花始の予測日と実測日の誤差

注) 誤差は、各方法について予測日と実測日の差を算出した結果で、正の数であれば実測日の方が早く、負の数であれば予測日の方が早いことを示す。

以上の結果から、気象予報を活用することによって開花期の予測精度を改善することができた。特に3月中旬に2週間予報を活用することで千葉市の「幸水」について誤差3日以内で開花日を予測できることが明らかになった。また、本試験では気温データを用いるアメダス地点の選択によって予測精度を改善できる可能性が示唆された。今後県内での予報を用いた予測可能地点の拡大を図る上では、圃場に近しい条件のアメダス地点の選択を行うとともに、再予報データと実測の開花日の解析をさらに進める必要がある。

第3表 気象庁発表の1か月予報を活用した「幸水」開花始の予測精度

気温予測	1991～2020年		2011～2020年	
	決定係数	RMSE (日)	決定係数	RMSE (日)
平年値	0.09	5.6	0.11	7.7
1か月気温予報値（アンサンブル平均）	0.50	4.6	0.56	6.2
1か月気温予報値（累積確率70%）	0.48	3.8	0.57	4.9

注1) 開花始の決定係数は、予測日と実測日を回帰分析して算出した。

2) RMSEは実測日と予測日との差を平均二乗誤差 ($X = \sqrt{(X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2 / n)}$) として算出した。

V 謝 辞

本研究の実施にあたり御助言をいただいた気象庁の皆さま、関係機関の皆さまに深謝の意を表する。

VI 摘 要

千葉県農林総合研究センター果樹研究室では2013年にナシ開花予測システムを開発した。本システムは1980～2009年の気象データに基づいて作成されており、近年の温暖化の影響が反映されていないため、新たに2010～2021年の開花期のデータをシステムに反映させるとともに、気象庁が公表する1か月予報や2週間予報を活用し、予測精度の検証を行った。その結果、平年値の代わりに予報値を用いることで早期の予測精度を上げることができた。特に、アンサンブル平均で発表されている予報値より高い確率（累積確率70%）の予報値を予測に用いることで精度は向上した。

VII 引用文献

文部科学省及び気象庁（2020）日本の気候変動 2020 - 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書 -
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>
最終アクセス日10月21日
日本気象学会（2012）新用語解説 再予報・ハインドキャ

ストhttps://metsoc.jp/tenki/pdf/2012/2012_06_049

3. pdf最終アクセス日11月19日

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.

曾根田友暁（2022）神奈川県におけるニホンナシ生育予測システムの開発と気温上昇がナシ開花日に及ぼす影響. 神奈川農技セ報. 66:41-54.

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. 園芸学研究. 6: 257-263

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.

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.

田中実・林田誠剛（2008）長崎県におけるニホンナシ‘幸水’および‘豊水’の生育予測・長崎果樹試研報11: 29-42.

戸谷智明・川瀬信三（2011）気温上昇が千葉県内におけるニホンナシ‘幸水’の休眠期と開花期に及ぼす影響. 園芸学研究10: 531-536.

戸谷智明・川瀬信三（2013）生育予測モデルに基づくニホンナシ開花予測システムの開発, 千葉農総研研報. 5: 11-16.

Improved Accuracy in Predicting the Flowering of Japanese Pear (var. Kosui) Using Meteorological Forecasts

Natsuki KANEKO* and Masayoshi OSHIDA

Key words: Japanese pear, bloom forecast, global warming, meteorological forecasts

Summary

We investigated the prediction accuracy of the Japanese pear bloom forecasting system by adding recent data. We also investigated the accuracy of our own bloom forecasting system that uses the long-term forecasts published by the Japan Meteorological Agency (JMA).

1. In the Japanese pear production areas in Chiba Prefecture, the error margin for predicting the flowering of 'Kosui' was within about three days.
2. The accuracy of the early forecast for 'Kosui' was improved by using the forecasted temperature value rather than the average value.

* Chiba Prefectural Agriculture and Forestry Research Center; 180-1, Okanezawa, Midori, Chiba 266-0014, Japan.