

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

曾根田友暁

Development of a Growth Prediction System and the Influence of Temperature Rise on the Anthesis of Japanese Pears in Kanagawa Prefecture

Tomoaki SONEDA

摘 要

近年の気象条件下や今後の温暖化への対応のため、ニホンナシの収穫期や開花期を精度よく予測できる技術開発と気温上昇がナシ開花期に及ぼす影響の評価が必要となっている。そこで、神奈川県農業技術センターにおける過去の気象・生育データを利用し、ニホンナシの収穫予測システムおよび開花予測モデルを開発した。

‘香麗’、‘なつみず’、‘幸水’では満開後一定期間の気温と果実生育日数の相関を利用して収穫予測式を作成し、予測式を搭載した収穫予測システムを開発した。

‘幸水’および‘豊水’では自発休眠期と他発休眠期の生育モデルを統合した開花予測モデルを作成した。気温予測値を利用することで、‘幸水’で DVI2 値=0.40 時点、‘豊水’で DVI2 値=0.55 時点で開花日が予測できると考えられた。

また、開花予測モデルを利用して、過去の気温データを 1℃ずつ上昇させて開花日を予測したところ、開花日の遅れや不開花は 2016 年以降の気温データを気温上昇させたときに発生しやすい傾向であった。

キーワード：自発休眠，発育速度モデル，メッシュ農業気象データ，温暖化

Summary

In order to respond to recent weather conditions and global warming, it is necessary to develop technologies that can precisely predict the harvesttime and anthesis of Japanese pear, and to evaluate the influence of temperature rise on the anthesis.

In this study, we have developed prediction system for harvesttime and prediction model for anthesis of Japanese pears, using past weather and growth data at Kanagawa Agricultural Technology Center.

We have developed the prediction formula and system of harvesttime for ‘Korei’, ‘Natsumizu’ and ‘Kosui’ using the correlation between temperature and fruit growth days during a certain period after full bloom.

The prediction model of anthesis created for ‘Kosui’ and ‘Hosui’ was made by integrating the growth models for the endodormancy and ecodormancy stages. Using the temperature prediction value, the anthesis was predictable with a DVI2 value = 0.40 and 0.55 time points for ‘Kosui’ and ‘Hosui’, respectively.

We have also used the model to predict the anthesis by increasing past temperature data by 1 °C. Delay of flowering date or non-flowering were more likely to occur when the temperature data from 2016 onwards were increased.

Key words: endodormancy, developmental rate model, The Agro-Meteorological Grid Square Data, global warming

緒言

近年の温暖化により、ニホンナシでは開花期や成熟期の前進化が指摘されており（杉浦ら 2007）、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によると、少なくとも今世紀半ばまでは世界平均気温は上昇すると報告されている（IPCC 2021）。

今後もニホンナシの開花期や成熟期は変動を続けていくと考えられるため、生育予測モデルに基づいた生育予測を実施することで、計画的な作業支援や販売計画支援を図ることができると考えられる。

ニホンナシの主要品種‘幸水’では満開後一定期間の気温から収穫期を予測する回帰式が作成されており（杉浦 1997）、栃木県（大谷 2006a）や長崎県（田中・林田 2008）でも同様の手法により回帰式が作成されている。回帰式に利用するパラメータは実施場所により異なっているため、本県に適合した収穫予測式を作成する必要がある。

また、本県のニホンナシは旧盆前の贈答用としての需要が高いため、当所では旧盆前に収穫できる‘香麗’および‘なつみず’を育成している（曾根田ら 2011）。両品種についても同様の手法により収穫予測式を作成することで、旧盆前の販売計画が立てやすくなることが期待される。

さらに、普及現場で効率的に利用するため、作成した収穫予測式を搭載し、容易に操作が可能なシステム開発が求められる。

ニホンナシの開花期を予測するモデルとしては、自発休眠期と他発休眠期の生育モデルを統合した発育速度モデル（杉浦ら 1991、杉浦 1997、杉浦・本條 1997、杉浦ら 2003）が作成されている。栃木県（大谷 2006b）や長崎県（田中・林田 2008）、千葉県（戸谷・川瀬 2013）も同様の手法で開花予測モデルを作成しているが、モデルに利用するパラメータは実施場所により異なるケースがあるため、本県に適合したモデルを作成する必要がある。

また、本モデルでは休眠期から開花期に至るまでの特別気温データを利用して開花予測日を算出するため、

気温予測値を利用して開花前に事前に予測した場合の精度検証や、実用的な開花予測が可能となる時期を明らかにする必要がある。

さらに、秋冬季の気温上昇が進むと、自発休眠覚醒時期の遅延や覚醒進行不順により、開花期の遅延（本條 2007）や発芽不良（Ito et al. 2018）を引き起こす可能性があることが報告されている。

本県のニホンナシの開花においては、上記のような自発休眠が関係したと思われる影響は今のところ観測されていないが、杉浦ら（2009）によれば、ニホンナシ、リンゴなどの果樹は永年性で気候に対する適応性の幅が狭いとされており、将来的な気候変動を想定した影響評価を早期に実施することは重要であると考えられる。

そこで、本研究では本県に適合したニホンナシの収穫予測システムおよび開花予測モデルを作成し、実用的な開花予測が可能となる時期を明らかにするとともに、気温上昇が開花期に及ぼす影響を検討する。

材料および方法

1. 収穫予測システムの開発

‘香麗’、‘なつみず’、‘幸水’について、満開日を基点として満開後 14~40 日間の日平均気温の平均値を算出し、果実生育日数（収穫始期および収穫盛期まで）との相関を分析した。満開日は 8 割開花日、収穫始期は適熟果の最初の収穫日、収穫盛期は収穫果率が 50%を超えた日とした。

相関係数の最も高い満開後日数を利用し、平均気温と果実生育日数の関係を回帰直線で示す収穫予測式を作成し、予測日と実測日との誤差日数および予測誤差（RMSE・日）を検証した。

予測式作成と誤差検証には、神奈川県農業技術センター（平塚市上吉沢・以下、神奈川県農技 C）における気象および生育データ（‘幸水’は過去 15 年間（2003~2017 年）、‘香麗’および‘なつみず’は過去 10 年間（2008~2017 年））を利用した。気象データは神奈

川農技Cの敷地内に設置している気象観測装置のデータを利用した。

現地における適用性検証のため、2019年度に以下の県内4園地および神奈川農技Cの気温測定および生育調査を行い、収穫予測式から算出した予測日と実際の収穫日との予測誤差を検証した。

A園：川崎市麻生区黒川

B園：横浜市泉区中田町

C園：藤沢市菖蒲沢

D園：秦野市鶴巻

現地での気温測定には温度データロガー（サーモクロンGタイプ、KNラボラトリーズ）を用い、園中央部棚面の特別気温を測定した。

収穫予測システムの開発にはMicrosoft Excel 2013を利用し、作成した収穫予測式を搭載し、普及部署で容易に利用できるような関数機能で収穫日を計算することを要件とした。

2. 開花予測モデルの開発

‘幸水’および‘豊水’について、杉浦・本條（1997）が開発した予測式 DVI1 と DVI2 を用い、両式の接続点および予測日とする DVI2 値を本県におけるデータを用いて見直すことで、本県において精度よく開花日を予測できるモデルを開発した。ここでの開花日は開花始期（2割開花日）とした。

具体的には、10月1日から開花実測日までの気温データを利用し、DVI1モデル（自発休眠期生育モデル）とDVI2モデル（他発休眠期生育モデル）の接続点をDVI1値で1.0～2.0まで変動させて開花実測日のDVI2値を算出した。算出したDVI2値の年次間の標準偏差が最も小さくなる接続点を採用し、その時の開花実測日のDVI2値の平均値に到達した日を開花予測日として採用した。

モデルによる予測日と実測日との予測誤差（RMSE・日）を算出し、モデルの適合性を検証した。

モデル作成と適合性検証は、まず、2018年度に過去15年間（2004～2018年）の神奈川農技Cにおける生育・気象データを利用して実施した（旧モデル）。その後、利用できるデータ数が増えたため、2020年度に過去20年間（2001～2020年）のデータを利用して再度

実施した（新モデル）。気象データは神奈川農技Cの敷地内に設置している気象観測装置のデータを利用した。

現地における適用性検証のため、2019年度に以下の県内4園地および神奈川農技Cの気温測定および生育調査を行い、旧モデルによる予測日と実測日との予測誤差を検証した。

A園：横浜市戸塚区平戸町

B園：藤沢市菖蒲沢

C園：秦野市鶴巻

D園：足柄上郡中井町田中

現地での気温測定には温度データロガー（サーモクロンGタイプ、KNラボラトリーズ）を用い、園中央部棚面の特別気温を測定した。

3. 開花予測可能時期の検証

2で実施した誤差検証については、開花日に至るまでの気温データはすべて実測値を利用しており、事前に予測した場合の予測精度や予測可能時期を明らかにするため、以下の手法により検証を行った。

まず、農研機構メッシュ農業気象データ（大野ら2016）および「過去に配信したメッシュ農業気象データを再現するためのプログラム（機構-X12）」を利用して、2011～2019年の各年における3/1～4/15に配信された過去毎日の日別気温予測値を取得した。また、メッシュ農業気象データの日別気温観測値（2001～2020年）を取得し、それを20年分平均したデータを日別気温平年値とした。メッシュ農業気象データの取得地点は神奈川農技Cが含まれる3次メッシュ地点とした。

上記によりメッシュ農業気象データから取得・計算した日別気温予測値と日別気温平年値の気温差（日別差）を、神奈川農技Cの当該日の毎時の特別気温平年値（2001～2020）に一律で補正することで、過去の特別気温予測値データを過去毎日分作成して開花予測に利用した。

2011～2019年の3/1～4/15にかけて、予測実施日の前日までは神奈川農技Cにおける実測値、予測実施日以降は上記で作成した特別気温予測値を利用して、新モデルによる開花予測を過去毎日分実施した。同様に、

予測実施日以降に平年値を利用した予測も行った。

上記により算出した予測日の5日間移動平均日を利用し、すべて実測値を利用した場合との誤差（モデルとの誤差）および開花実測日との誤差から、予測誤差（RMSE）を他発休眠期生育ステージ（DVI2 値で0.05 間隔）ごとに算出した。

4. 気温上昇が開花日に及ぼす影響

過去21年分（2001～2021年）の神奈川農技Cにおける特別気温を基礎データとし、最長-2～+5℃の範囲内で1℃ずつ変動させた気温データを利用して開花日の予測を行った。ここでは、開花予測モデル（新モデル）上で4/30までに開花しなかったケースを不開花とし、各年において変動させた温度範囲内で最も早く開花した日を最早開花日とした。

将来期間の気温データとして、農研機構メッシュ農業気象データに搭載されているメッシュ温暖化シナリオデータ（西森ら 2019）から神奈川農技Cの含まれる3次メッシュ地点の日平均気温を取得した。データ範囲は、全球気候モデル5種類（MRI-CGCM3, MIROC5, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-CM3, HadGEM2-ES）、温室効果ガス排出シナリオ2種類（RCP8.5, RCP2.6）とし、2022～2100年の各年について前年10月～当年4月のデータを取得した。全球気候モデルと温暖化シナリオの組み合わせごとに20年間隔（ただし、「2030年頃」は2022～2040年の19年分）で平均気温を集計した。基準となる現在気温として、メッシュ農業気象データから取得した神奈川農技Cの含まれる3次メッシュ地点の日平均気温（2001～2020年）を利用した。

結果

1. 収穫予測システムの開発

各品種の満開後の平均気温と果実生育日数の相関を分析したところ、「香麗」では収穫始期・盛期ともに満開後18日間、「なつみず」では収穫始期は30日間、盛期は24日間、「幸水」では収穫始期・盛期ともに16日間の平均気温との相関が最も高かった（図1）。

最も相関が高かった満開後日数を利用し、満開後の平均気温をx、満開から収穫期までの果実生育日数をy

とする収穫予測式は以下のとおりであった（図2）。

$$y = -1.5192x + 130.03 \dots \text{‘香麗’ 収穫始期}$$

$$y = -1.5897x + 137.07 \dots \text{‘香麗’ 収穫盛期}$$

$$y = -2.2392x + 146.74 \dots \text{‘なつみず’ 収穫始期}$$

$$y = -1.6109x + 147.09 \dots \text{‘なつみず’ 収穫盛期}$$

$$y = -1.4913x + 140.38 \dots \text{‘幸水’ 収穫始期}$$

$$y = -1.2913x + 147.69 \dots \text{‘幸水’ 収穫盛期}$$

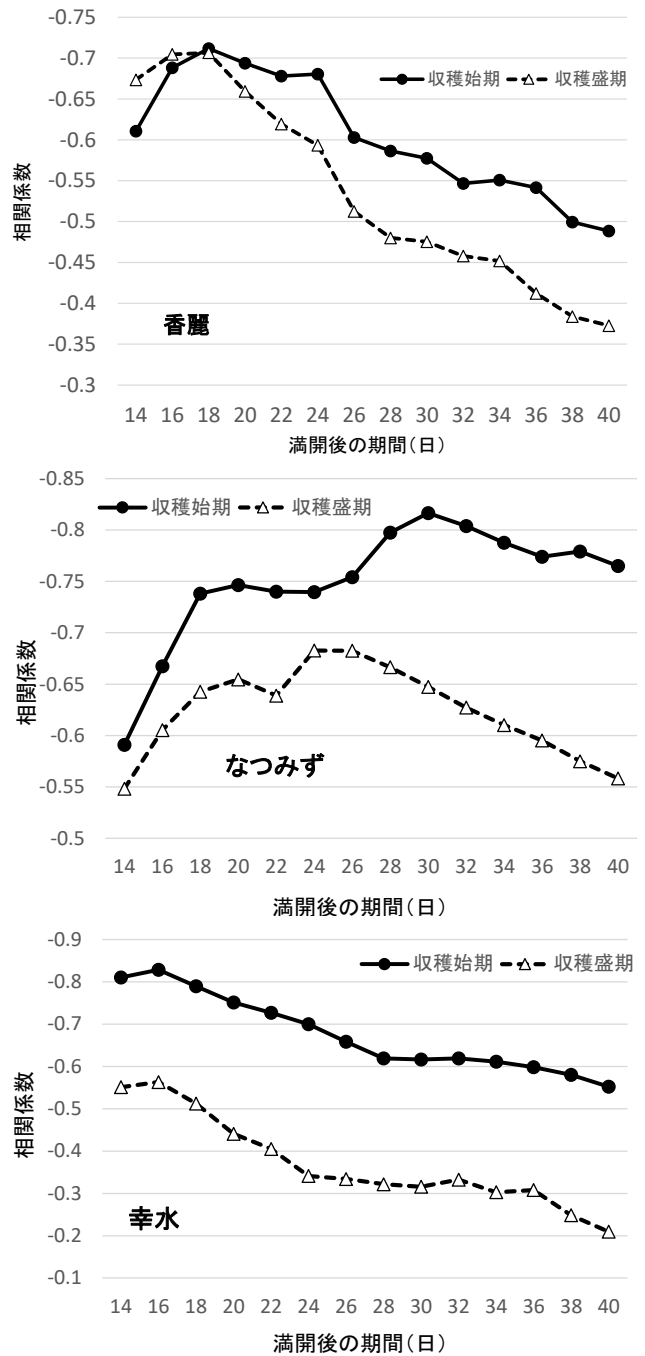


図1 満開後指定期間の平均気温と果実生育日数の相関係数

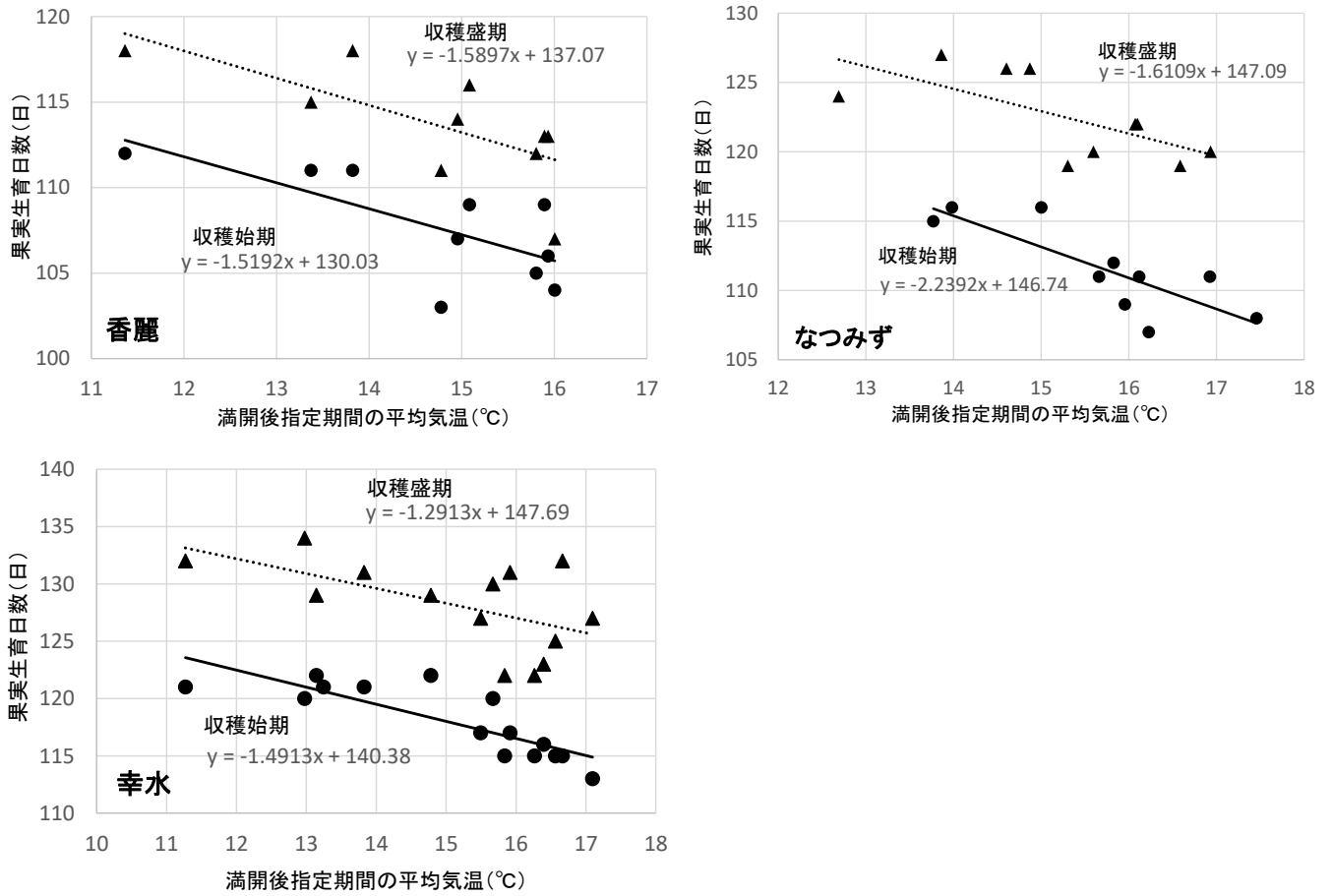


図2 満開後指定期間^zの平均気温と果実生育日数の関係

^z: 満開後指定期間は、‘香麗’収穫始期・盛期は18日、‘なつみず’
始期は30日、盛期は24日、‘幸水’始期・盛期は16日

表1 収穫予測式を過去データに適用したときの予測誤差

品種	項目	RMSE ^z	予測誤差日数 (データ数)			
			1日以内	2日	3日	4日以上
香麗	収穫始期	2.21	5	3	1	1
	収穫盛期	2.38	6	0	3	1
なつみず	収穫始期	1.73	6	2	2	0
	収穫盛期	2.04	4	3	3	0
幸水	収穫始期	1.78	10	2	2	1
	収穫盛期	3.21	6	1	2	5

^z: 誤差日数の2乗平均平方根

過去データを利用して上記の収穫予測式により予測日を算出し、実測日との誤差を検証したところ、予測誤差(RMSE)は‘香麗’収穫始期で2.21日、収穫盛期で2.38日、‘なつみず’始期で1.73日、盛期で2.04日、‘幸水’始期で1.78日、盛期で3.21日であった(表1)。

各品種とも収穫始期のほうが盛期より予測誤差は小さく、検証に利用したデータ数の80%において±2日以内で予測できた(表1)。

2019年度に現地データを利用して検証したところ、一部の品種・園地の組み合わせではやや誤差が大きかったが、検証に利用したデータ数の75%において2日以内で予測できた(表2)。

上記の収穫予測式を搭載し、栽培品種、栽培地域、満開日を画面上で選択することで、収穫予測日および果実生育日数を算出・表示できる収穫予測システムを開発した(図3)。

表2 各園地における収穫予測日と実測日の誤差日数(2019)

品種		A園	B園	C園	D園	農技C	
香麗	収穫始期	予測日	7/25	7/23	7/22	7/24	7/26
		実測日	7/30	7/25	7/22	7/25	7/29
		誤差日数	-5	-2	0	-1	-3
	収穫盛期	予測日	7/31	7/29	7/28	7/30	8/1
		実測日	8/4	8/2	7/28	8/1	8/1
		誤差日数	-4	-4	0	-2	0
なつみず	収穫始期	予測日	7/30	7/29			7/30
		実測日	8/1	7/29			7/29
		誤差日数	-2	0			+1
	収穫盛期	予測日	8/9	8/8			8/9
		実測日	8/10	8/8			8/7
		誤差日数	-1	0			+2
幸水	収穫始期	予測日	8/7	8/8	8/6		8/9
		実測日	8/9	8/9	8/5		8/15
		誤差日数	-2	-1	+1		-6
	収穫盛期	予測日	8/18	8/18	8/16		8/19
		実測日	8/17	8/20	8/17		8/26
		誤差日数	+1	-2	-1		-7

神奈川県版ニホンナシ収穫予測システム 2021/05/14

満開日と満開後気温データ(平年値と実績値)から収穫期を予想します。

①~④を選択・入力すると、下表に予測日が表示されます。

① 栽培品種

② 栽培地域

③ 満開日 (満開日は8割の花が開花した日)

④ 気温の平年値は 年~2011年の平均値です(10年間)。

収穫予想日

収穫始期	7月20日	頃	今年の満開日(4/1)からの果実生育日数は110日です。 平年の4/1からの果実生育日数は111日です。
収穫盛期	7月26日	頃	今年の満開日(4/1)からの果実生育日数は117日です。 平年の4/1からの果実生育日数は118日です。

(収穫始期は適熟果が収穫できた最初の日、収穫盛期は累計で全果数の半数を収穫した日)

(参考)農技Cナシ園場における平年値(香麗、2008~2017年)

満開日	4月12日
収穫始期	7月28日(果実生育日数は107日)
収穫盛期	8月3日(果実生育日数は113日)

<注意事項>
 このニホンナシ収穫予測システムは、当所ナシ園場の過去の生育データ及び気温データから得られた収穫予測モデルを利用し、満開日と各地の当年の気温データから収穫予測日を算出したものです。実際の生育は、栽培環境やその他気象条件等によっても異なりますので、参考程度としてご利用ください。

図3 開発した収穫予測システム(Microsoft Excel 2013での表示画面)

2. 開花予測モデルの開発

DVI1モデルとDVI2モデルの接続点を検証したところ、旧モデル・新モデルともに、‘幸水’はDVI1値=1.9、‘豊水’はDVI1値=1.7でDVI2モデルに接続すると、開花実測日のDVI2値の標準偏差が最も小さかった（図4、旧モデルはデータ略）。

開花実測日のDVI2値は‘幸水’新モデルで0.866、旧モデルで0.858、‘豊水’新モデルで1.008、旧モデルで1.011となり、どちらのモデルもほぼ同程度であった（データ略）。

過去データを用いて実測日との予測誤差（RMSE）を検証したところ、‘幸水’では新モデル、旧モデルともに2.04日、‘豊水’では新モデル1.87日、旧モデル1.77日であり、どちらもほぼ同等の精度で適合していた（表3）。

2019年度に現地データを利用して旧モデルで開花予測日を検証したところ、現地では実測日より6～9日早かったが、神奈川農技Cでは‘幸水’で1日、‘豊水’で3日の誤差であった（表4）。

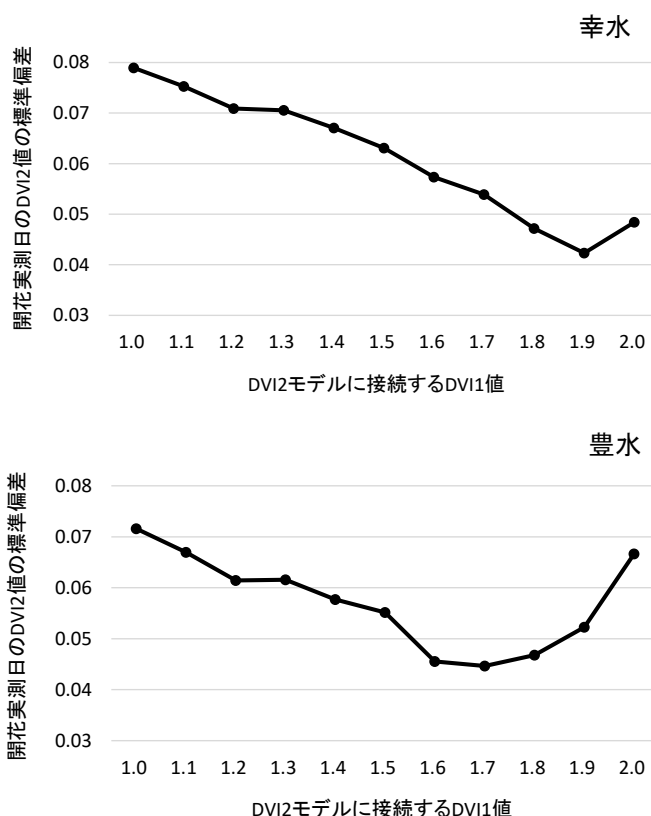


図4 DVI2モデルに接続するDVI1値を変動させたときの開花実測日におけるDVI2値の標準偏差（新モデル作成時、上：幸水、下：豊水）

表3 新モデルと旧モデルにおける開花予測日と実測日との予測誤差

開花年	幸水					豊水				
	実測日	旧モデル		新モデル		実測日	旧モデル		新モデル	
		予測日	誤差	予測日	誤差		予測日	誤差	予測日	誤差
2020	4/4	4/3	-1	4/3	-1	3/28	3/28	0	3/28	0
2019	4/8	4/7	-1	4/7	-1	4/3	4/5	+2	4/5	+2
2018	4/3	4/1	-2	4/1	-2	4/1	3/31	-1	3/30	-2
2017	4/12	4/14	+2	4/14	+2	4/13	4/12	-1	4/12	-1
2016	4/11	4/10	-1	4/10	-1	4/6	4/5	-1	4/5	-1
2015	4/10	4/6	-4	4/6	-4	4/6	4/4	-2	4/3	-3
2014	4/10	4/9	-1	4/9	-1	4/8	4/4	-4	4/4	-4
2013	4/4	3/29	-6	3/29	-6	3/31	3/28	-3	3/28	-3
2012	4/17	4/17	0	4/17	0	4/15	4/16	+1	4/16	+1
2011	4/16	4/14	-2	4/14	-2	4/13	4/13	0	4/13	0
2010	4/11	4/12	+1	4/12	+1	4/8	4/9	+1	4/9	+1
2009	4/11	4/9	-2	4/10	-1	4/8	4/7	-1	4/7	-1
2008	4/11	4/12	+1	4/12	+1	4/9	4/10	+1	4/10	+1
2007	4/8	4/9	+1	4/10	+2	4/6	4/4	-2	4/4	-2
2006	4/9	4/10	+1	4/11	+2	4/6	4/9	+3	4/9	+3
2005	4/14	4/15	+1	4/15	+1	4/12	4/13	+1	4/12	0
2004	4/10	4/9	-1	4/9	-1	4/7	4/7	0	4/7	0
2003	4/14	4/12	-2	4/13	-1	4/13	4/11	-2	4/11	-2
2002	4/1	4/2	+1	4/2	+1	3/29	3/30	+1	3/30	+1
2001	4/9	4/9	0	4/9	0	4/6	4/8	+2	4/8	+2
平均	4/9	4/8	-0.75	4/9	-0.55	4/6	4/6	-0.25	4/6	-0.40
RMSE			2.04		2.04			1.77		1.87

表 4 各園地における開花予測日と実測日の誤差日数 (2019)

品種		A園	B園	C園	D園	農技C
幸水	予測日	3/29	3/28	3/29	3/28	4/3
	実測日	4/4	4/4	4/6	4/5	4/4
	誤差日数	-6	-7	-8	-8	-1
豊水	予測日	3/24	3/25	3/23	3/23	3/28
	実測日	3/31	3/31	4/1	4/1	3/31
	誤差日数	-7	-6	-9	-9	-3

3. 開花予測可能時期の検証

(1) モデルとの誤差検証

材料と方法の3内で示した特別気温作成方法による開花予測日の算出を行うにあたり、同手法により過去20年分(2001~2020年)の特別気温を作成し、同期間の実測値を利用して開花予測を行った場合との休眠期生育日数の誤差を検証した。

作成した特別気温値を利用することで、実測値を利用した場合より他発休眠期間が‘幸水’で2.65日(63.6h) , ‘豊水’で2.55日(61.2h)遅れたため(データ略), 予測実施日のDVI2値に応じて上記の時間数を補正して開花予測日を算出した。

開花期に至るまですべて気温実測値を利用した場合との誤差(モデルとの誤差)を検証したところ, ‘幸水’, ‘豊水’ともに予測値を利用することで, 平年値利用より予測誤差が小さくなる傾向であった。また, ‘幸水’ではDVI2値=0.55付近, ‘豊水’ではDVI2値=0.70付近で予測誤差は大きく減少した(図5)。

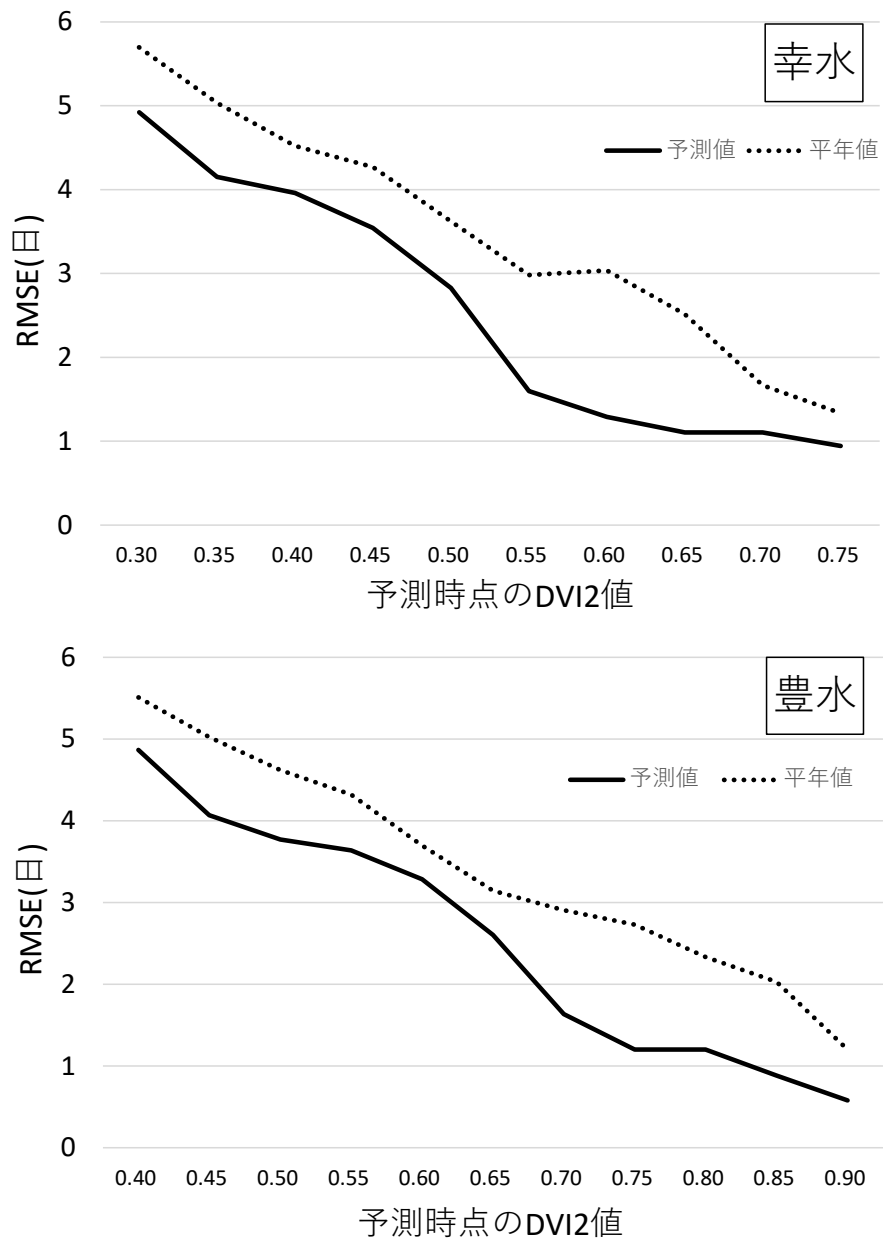


図5 DVI2 値に応じて開花予測したときの生育予測モデルとの予測誤差 (上: 幸水, 下: 豊水)

(2) 実測日との誤差と予測可能時期の検証

本研究で作成した開花予測モデルで算出した開花予測日は、実測日より‘幸水’で 0.55 日，‘豊水’で 0.40 日早くなったが（表 3），ここでの検証期間（2011～2019 年）においては‘幸水’で 1.67 日（約 40 h），‘豊水’で 1.22 日（約 29 h）早い時点を実測日としていたため（データ略），この時間数を一律に補正して開花予測日を算出した。また，(1)と同様に特別気温作成方法による誤差も補正した。

開花実測日との誤差を検証したところ，モデルとの予測誤差と同様に予測値を利用することで平年値利用より予測誤差は小さくなる傾向であった（図 6）。

また，予測値を利用した場合，モデル自体がもつ予測誤差と同等の精度で予測が実施できるようになるのは，‘幸水’で DVI2 値=0.55 時点，‘豊水’で DVI2 値=0.70 時点であり，両品種とも平年値を利用するより DVI2 値で 0.15 早い時点から予測可能であった（図 6）。

一方，上記の手法により事前に開花日を予測した場合，予測日は実測日より遅くなる傾向があったため（表 5），DVI2 値で 0.05 ごとにこの遅れを補正した。

その結果，両品種とも予測誤差が大きく減少し，予測値を利用した場合は‘幸水’で DVI2 値=0.40 時点，‘豊水’で DVI2 値=0.55 時点でモデル自体がもつ予測誤差と同等の精度で予測可能であった（図 6、「予測値補正」および「平年値補正」）。

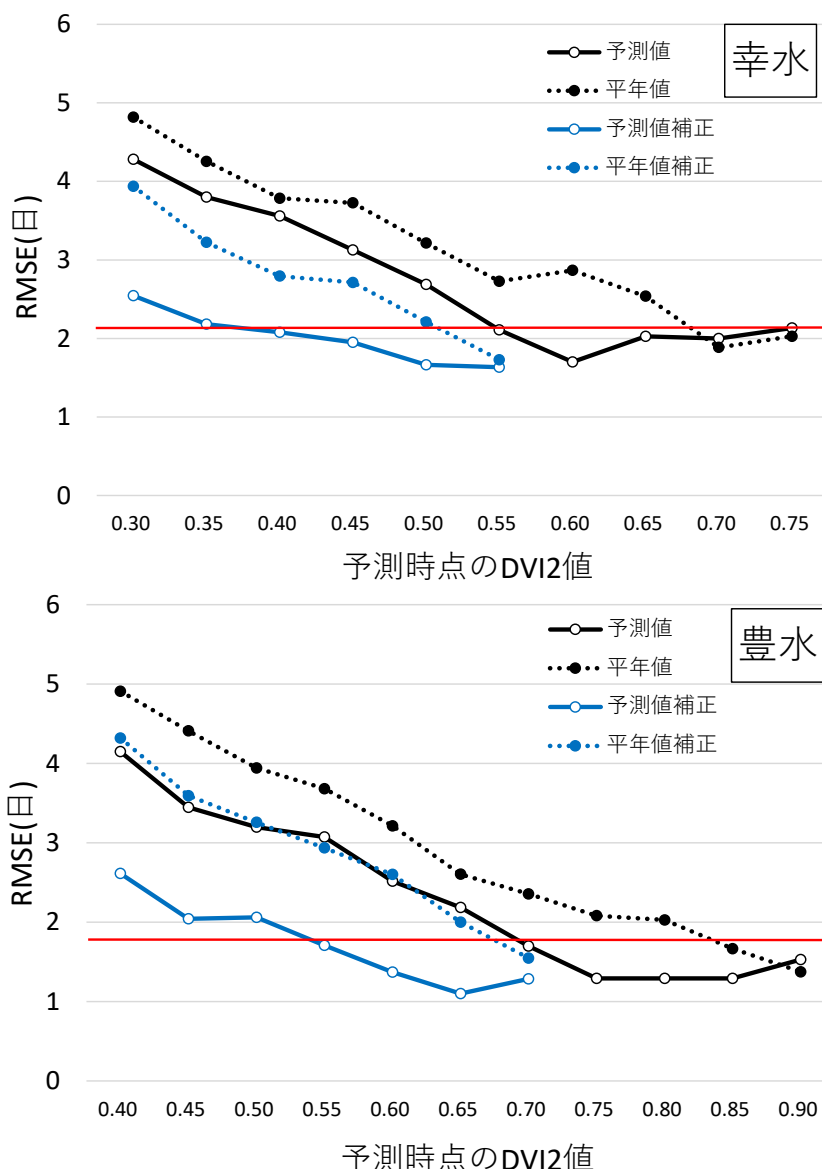


図 6 DVI2 値に応じて開花予測したときの開花実測日との予測誤差（上：幸水，下：豊水）
（赤線は生育モデル自体の RMSE を示す）
（「補正」は，事前予測時の誤差補正を実施したもの）

表 5 開花予測日と実測日の誤差日数（日）

予測時 DVI2値	幸水		予測時 DVI2値	豊水	
	予測値	平年値		予測値	平年値
0.30	3.44	2.78	0.40	3.22	2.33
0.35	3.11	2.78	0.45	2.78	2.56
0.40	2.89	2.56	0.50	2.44	2.22
0.45	2.44	2.56	0.55	2.56	2.22
0.50	2.11	2.33	0.60	2.11	1.89
0.55	1.33	2.11	0.65	1.89	1.67
			0.70	1.11	1.78

表 6 過去の気温実測値の変動量 (°C) が開花予測日と不開花発生に及ぼす影響^z

開花年	幸水								豊水								
	-2°C	-1°C	0°C (実測)	1°C	2°C	3°C	4°C	5°C	-2°C	-1°C	0°C (実測)	1°C	2°C	3°C	4°C	5°C	
2001			4/9	4/7	4/5	4/7	4/19	-				4/8	4/5	4/3	3/30	4/7	-
2002		4/4	4/2	4/1	4/2	-	-	-		4/2	3/30	3/29	3/28	4/4	-	-	
2003			4/13	4/9	4/7	4/8	4/12	-			4/11	4/8	4/5	4/5	4/7	4/13	
2004		4/12	4/9	4/6	4/10	4/12	-	-		4/10	4/7	4/3	4/1	4/8	4/15	-	
2005			4/15	4/12	4/11	4/13	-	-			4/12	4/10	4/9	4/9	4/16	-	
2006			4/11	4/5	4/3	3/31	4/5	-			4/9	4/3	3/29	3/27	3/26	4/4	
2007	4/16	4/13	4/10	4/10	4/16	-	-	-	4/14	4/9	4/4	4/3	4/8	4/15	-	-	
2008			4/12	4/8	4/4	4/3	4/6	-			4/10	4/5	4/2	3/30	3/29	4/21	
2009		4/11	4/10	4/8	4/10	4/17	-	-		4/10	4/7	4/5	4/8	4/9	-	-	
2010			4/12	4/10	4/7	4/14	-	-			4/9	4/6	4/5	4/3	4/19	-	
2011			4/14	4/13	4/11	4/14	4/21	-			4/13	4/9	4/8	4/9	4/12	-	
2012			4/17	4/13	4/11	4/9	4/10	4/27			4/16	4/11	4/8	4/5	4/4	4/11	
2013		4/4	3/29	3/29	3/28	3/27	-	-		4/2	3/28	3/23	3/24	3/23	3/24	-	
2014			4/9	4/5	4/3	4/5	-	-			4/4	4/4	4/1	3/31	4/4	-	
2015			4/6	4/3	4/2	4/18	-	-			4/3	4/1	3/31	4/2	-	-	
2016	4/14	4/10	4/10	4/10	4/18	-	-	-	4/11	4/8	4/5	4/7	4/9	-	-	-	
2017	4/18	4/16	4/14	4/15	4/16	4/22	-	-	4/16	4/14	4/12	4/9	4/13	4/16	-	-	
2018		4/4	4/1	3/29	3/29	4/3	-	-		4/2	3/30	3/28	3/26	3/27	4/9	-	
2019	4/16	4/13	4/7	4/11	4/23	-	-	-	4/14	4/7	4/5	4/1	4/6	4/29	-	-	
2020	4/5	4/4	4/3	4/11	-	-	-	-	4/2	3/28	3/28	4/2	4/20	-	-	-	
2021	4/1	3/30	3/29	4/1	-	-	-	-	3/30	3/28	3/26	3/28	4/2	-	-	-	
平均 ^y			4/8	4/7	4/10	4/15	4/25	4/30			4/5	4/3	4/4	4/9	4/17	4/27	
(不開花年以外)			4/8	4/7	4/8	4/9	4/12	4/27			4/5	4/3	4/4	4/5	4/6	4/12	
不開花発生年数			0	0	2	6	15	20			0	0	0	3	9	17	
最早開花日出現年数		1	6	6	8	4	0	0		1	3	5	7	6	3	0	

z : 赤色は不開花発生, 黄色は各年の最早開花日を示す

y : 上段は2001~2021年の平均 (不開花年は5/1開花とした), 下段は不開花年を除いた平均

表 7 各将来期間^zにおける 10~翌 4 月の平均気温の上昇量 (°C)

RCPシナリオ	全球気候モデル	2030年頃	2050年頃	2070年頃	21世紀末頃
RCP8.5	MIROC5	0.81	1.93	2.99	3.97
	MRI-CGCM3	0.01	0.72	2.13	3.23
	GFDL-CM3	1.72	3.03	4.64	6.11
	CSIRO-Mk3-6-0	0.75	1.97	3.17	4.71
	HadGEM2-ES	0.85	2.05	3.66	4.80
	平均		0.83	1.94	3.32
RCP2.6	MIROC5	0.89	1.27	1.20	1.37
	MRI-CGCM3	-0.20	0.00	0.15	0.27
	GFDL-CM3	1.30	2.06	2.38	2.16
	CSIRO-Mk3-6-0	0.60	1.03	1.30	1.56
	HadGEM2-ES	1.08	1.47	1.26	1.17
	平均		0.73	1.17	1.26

z: 「年頃」はその前後20年間の平均, 「21世紀末頃」は2081~2100年の平均

ただし, 「2030年頃」は2022~2040年の19年間の平均

4. 気温上昇が開花日に及ぼす影響

過去の実測気温を変動させて開花日を予測したところ、‘幸水’、‘豊水’ともに1℃気温上昇したときが最も平均開花日が早かった(表6)。

最早開花日は両品種とも2℃上昇した場合に最も出現回数が多かった。一方、実測値利用時が最早開花日となったのは‘幸水’で6カ年、‘豊水’で3カ年出現したが、このうち‘幸水’の2007年を除いたすべてが2016年以降に出現した(表6)。

不開花は‘幸水’では2℃上昇、‘豊水’では3℃上昇すると発生し始めるが、この時の発生年はいずれも2016年以降の気温データを利用した場合であった。5℃上昇すると‘幸水’では21カ年中20カ年、‘豊水’では17カ年で不開花となった(表6)。

RCP8.5シナリオの場合、2050年頃には現在の気温(2001~2020年)より1.94℃(0.72~3.03℃)の上昇、21世紀末頃には4.56℃(3.23~6.11℃)の上昇が予測されていた。一方、RCP2.6シナリオでは21世紀末頃でも1.31℃(0.27~2.16℃)の上昇に抑えられる予測結果であった(表7)。

考 察

ニホンナシでは、幼果期が高温であるほど細胞分裂期が短縮し、収穫期までの日数が短くなると報告されており(杉浦1997)、本報告でも満開後一定期間の気温と果実生育日数には負の相関があった。

‘香麗’および‘なつみず’の収穫予測において、収穫始期・盛期ともに過去データと概ね適合していたことから、‘幸水’前に収穫できる極早生~早生品種についても、‘幸水’と同様の手法により実用上十分な精度で収穫期の予測ができると考えられる。

本県では贈答用需要が高いため、一部の農家では‘幸水’の満開後30~40日後にジベレリンペースト処理を行って収穫期を早めることで旧盆前需要に対応している。一方、近年は開花期や収穫期が例年より早い年も多く、今後の温暖化進行に伴い、ジベレリンペースト処理が不要な年も増えてくると考えられる。本報告での収穫予測は‘幸水’では満開後16日経過時点で実施できるため、‘幸水’のジベレリンペースト処理の実施

有無の判断にも活用でき、‘香麗’や‘なつみず’の収穫期を予測することで、ニホンナシの収穫シーズンの開始予測や旧盆前の収穫量予測にも活用できると考えられる。

ニホンナシでは自発休眠期と他発休眠期の生育モデルを統合した開花予測モデル(杉浦・本條1997)が作成されている。本研究ではこの開花予測モデルを基本として、本県の気象・生育データを利用することで本県に適合したモデルを作成した。過去データを用いて検証したところ、‘幸水’で9割、‘豊水’で8割のデータにおいて±2日以内で実測日と適合しており、実用上十分な精度が得られていると考えられる。

他発休眠期に接続するDVI1値は‘幸水’で1.9、‘豊水’で1.7であった。‘豊水’の接続点が‘幸水’より早い時期であったことは、‘豊水’は‘幸水’より自発休眠覚醒に必要な低温要求量が少ない(Tamura et al. 2001)ことを裏付けているものと考えられる。

本研究では旧モデルで15年分、新モデルで20年分の気象・生育データを利用してモデルを作成したが、予測精度はどちらもほぼ同等であった。また、大谷(2006b)は10年分のデータから‘にっこり’の開花予測モデルを作成し、十分な予測精度であることを確認している。本研究では新モデル作成後は新モデルで開花予測を実施しているが、15年分のデータから作成した旧モデルでも十分実用的な開花予測ができるものと思われる。

本研究では収穫予測・開花予測ともに現地での検証を実施したが、開花予測では現地で誤差が大きい結果となった。現地での気温観測には簡易なデータロガーを利用していたため、長期間かつ気温データのみを利用して予測日を算出する開花予測においては、観測機器の精度が影響して誤差が大きくなったものと考えられる。このため、今後の活用方針として、開花予測については神奈川農技Cにおける開花予測日とその平年差を情報提供する予定である。

収穫予測式では、満開後16日~30日後までの気温実測値を利用して予測日を算出するため、通常は5月中に収穫予測日の情報を提供することが可能である。一方、開花予測モデルでは開花期に至るまでの特別気温データを利用するため、気温予測値を活用したうえ

で、どの時期にどの程度の精度で予測できるか検証することは実用上重要であると考えられる。

本研究において、過去の気温予測値と平年値を利用して、DVI2 値（他発休眠期生育ステージ）ごとにモデルと同等の精度で予測できる時期を検証したところ、両品種とも予測値を利用することで平年値利用時より DVI2 値で 0.15 早い時点から予測することができた。この時期は‘幸水’で DVI2=0.55 時点、‘豊水’で DVI2 値=0.70 時点で、ともに開花日の約 2 週間前であった。また、両品種ともこの時期に予測誤差が大きく減少して平年値利用時との差が拡大する傾向があり、モデル自体との誤差検証においても同様の傾向であった。本研究で利用したメッシュ農業気象データの予測値は、9 日先までは日別の予測値で、10 日～最長 26 日先までは移動平均の予測値となっている。開花日の約 2 週間前ころになると、精度が高いと推測される日別予測値の区間が予測データの大部分を占めることになり、この時期に予測精度が大きく向上したのと考えられる。

さらに、上記のように事前に予測した場合、予測時期が早いほど開花予測日が実測日より遅れる傾向であったため、この遅れを補正することで‘幸水’で DVI2=0.40 時点、‘豊水’で DVI2 値=0.55 時点でモデルと同等の精度で予測できると考えられた。‘幸水’の DVI2=0.40 到達日は平均 3 月 16 日（開花 24.4 日前）、‘豊水’の DVI2=0.55 到達日は平均 3 月 17 日（開花 20.9 日前）であるため、補正実施前より‘幸水’で 9.3 日、‘豊水’で 7.7 日早い時点から開花予測が可能と考えられた（表 8）。予測日の遅れが発生した要因としては、予測値期間以降は検証した 2011～2019 年よりも気温が低い平年値データ（2001～2020）を利用しているため、予測時期が早いほど平年値が多く利用されたことが影響したものと考えられる。本結果をもとに、予測可能時期となる開花日の 3 週間前頃に開花予測日の情報提供を進めていく予定である。

ニホンナシの開花日は、一定程度の気温上昇までは早まるが、さらに上昇すると逆に遅れ始め、完全な開花に至らない結果が

得られると報告されている（本條 2007）。本研究でも、1℃上昇時が最も平均開花日が早く、2℃上昇時に最早開花日が最も多く出現しており、全般的な傾向としては既報と同様である。一方、2016 年以降は実測値利用時が最も開花が早い年が多く、不開花も 2016 年以降の気温データを上昇させたときに発生しやすい傾向であった。近年の暖冬傾向を裏付けている結果と考えられ、今後さらなる気温上昇が進むと神奈川県においても開花期の遅れが発生し始める可能性があると思われる。

近年、記録的な暖冬年であった 2015 年秋～2016 年春に発生したナシ発芽不良の発生原因について、富永ら（2019）は施設栽培において自発休眠覚醒時期の遅延を指摘しており、Ito et al.（2018）は露地栽培において耐凍性低下や自発休眠進行不順を指摘している。本研究では自発休眠期および他発休眠期の生育モデルから作成した開花予測モデル上で、休眠の影響による不開花の発生可能性を検証しており、耐凍性の影響は考慮していない。

本研究における気温上昇が開花日に及ぼす影響とメッシュ温暖化シナリオデータによる将来期間の気温上昇量をみると、RCP8.5 シナリオ相当で温暖化が進んだ場合、2050 年頃に‘幸水’で不開花が発生し始める可能性があり、21 世紀末頃には‘幸水’、‘豊水’ともにほとんどの年が不開花となる可能性があると考えられる。一方、RCP2.6 シナリオ相当の気温上昇に抑えられた場合、21 世紀末頃においても不開花が発生する可

表 8 各 DVI2 値の到達日と開花前日数

幸水			豊水		
DVI2値	到達日 ^z	開花前日数	DVI2値	到達日 ^z	開花前日数
0.30	3月10日	31.0	0.40	3月8日	30.1
0.35	3月13日	27.4	0.45	3月11日	26.8
0.40	3月16日	24.4	0.50	3月14日	23.7
0.45	3月19日	21.3	0.55	3月17日	20.9
0.50	3月22日	18.2	0.60	3月19日	18.7
0.55	3月26日	15.1	0.65	3月22日	15.9
0.60	3月28日	12.4	0.70	3月25日	13.2
0.65	3月30日	10.2	0.75	3月27日	11.0
0.70	4月1日	8.3	0.80	3月29日	8.7
0.75	4月3日	6.3	0.85	3月31日	7.0
			0.90	4月1日	5.4

z：検証した9カ年の平均

能性は低いと考えられる。

本研究ではモデル上で開花しなかった場合を不開花として扱っており、本研究における不開花は実際に生じる発芽不良とは一致しない可能性がある。また、4種類ある RCP シナリオのうち、本研究で利用した RCP8.5 は最も気温上昇が大きいシナリオであり、RCP2.6 は最も気温上昇が小さいシナリオであるため、実際に生じる将来期間の気温上昇は RCP8.5 シナリオよりは小さいことも想定される。

本研究では上記の2シナリオのみでの検証であるため、現在の主要品種である‘幸水’や‘豊水’を今後安定生産するためにはどのシナリオを目指すべきかまでは明らかにできないが、少なくとも RCP8.5 シナリオ相当の気温上昇に至らないことは必要であると考えられる。

謝辞

ナシ開花予測モデルの作成にあたり、農研機構果樹茶業研究部門の杉浦俊彦グループ長補佐に作成方法などの助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 本條均. 2007. 気候温暖化が落葉果樹の休眠、開花現象に及ぼす影響. 園学研. 6(1) : 1-5.
- IPCC. 2021. Summary for Policymakers. In : Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.
- Ito,A., T.Sakaue, O.Fujimaru, A.Iwatani, T.Ikeda, D.Sakamoto, T.Sugiura and T.Moriguchi. 2018. Comparative phenology of dormant Japanese pear (*Pyrus Pyrifolia*) flower buds : a possible cause of ‘flowering disorder’. Tree Physiology. 38:825-839.
- 西森基貴・石郷岡康史・桑形恒男・滝本貴弘・遠藤伸彦. 2019. 農業利用のための SI-CAT 日本全国

1km 地域気候予測シナリオデータセット (農研機構シナリオ 2017) について. 日本シミュレーション学会誌. 38 : 150-154.

- 大野宏之・佐々木華織・大原源二・中園江. 2016. 実況値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成. 生物と気象. 16 : 71-79.
- 大谷義夫. 2006a. 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.
- 大谷義夫. 2006b. 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・内山真由美・柴田健一郎・川嶋幸喜・大井貴博・関達哉・北尾一郎・小泉和明. 2011. ニホンナシ新品種‘香麗’及び‘なつみず’の育成経過とその特性. 神奈川農技セ研報. 154 : 17-21.
- 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から開花期までの発育速度モデルについて. 農業気象. 46(4) : 197-203.
- 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(4) : 285-290.
- 杉浦俊彦・伊藤大雄・黒田治之・本條均. 2003. ニホンナシ混合芽の自発休眠覚醒を抑制する温度条件について. 農業気象. 59(1) : 43-49.
- 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. 園学研. 6(2) : 257-263.
- 杉浦俊彦・杉浦裕義・阪本大輔・朝倉利員. 2009. 温暖化が果樹生産に及ぼす影響と適応技術. 地球環境. 14(2) : 207-214.
- Tamura,F., K.Tanabe, A.Itai and M.Morimoto. 2001. Variations in the Chilling Requirements for Breaking Leaf Bud Endodormancy in Wild Pear Species and Pear Cultivars. J.Japan.Soc.Hort.Sci. 70(5) : 596-598.

- 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
- 富永晃好・渡邊辰彦・八幡昌紀. 2019. 施設栽培ニホ
ンナシにおける「発芽不良」の現状および要因
分析～福岡県の主要ニホンナシ山地である朝倉
地域の事例～. 園学研. 18(4) : 439-447.
- 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. 千葉県農
林総研研報. 5 : 11-17.
-