

温暖化傾向における果樹の発育速度 (DVR) モデルの検証

安達 義輝・志村 浩雄¹・額田 光彦・斎藤 祐一²・桑名 篤・安部 充³

Verification of the Developmental Rate (DVR) Model of Fruit Tree on Global Warming

Yoshiteru ADACHI, Hiroo SHIMURA¹, Mitsuhiko NUKADA, Yuichi SAITO²,
Atsushi KUWANA and Mitsuru ABE

Abstract

Recently, the budburst day of peach (*Prunus persica*), Japanese pear (*Pyrus pyrifolia*), and apple (*Malus × domestica*) tree showed the tendency to be accelerated by temperature rising. Furthermore, the harvest period of peach trees has been progressing significantly. The development prediction program was established based on the developmental rate (DVR) model in 2001 using the observation data of weather and fruit growth from 1976 to 2000 at Fukushima Agricultural Technology Centre of Fruit Tree Research Centre. The predicted value of that model was conformed to those data from 2001 to 2015. The model also was conformed to the year of high temperature condition (ex. 2004, 2007, and 2010).

Key Words : budburst day, developmental rate (DVR) model, full harvest time, global warming, stone hardening stage

キーワード : 発芽期、発育速度 (DVR) モデル、収穫期、温暖化、硬核期

1 緒言

果樹の生育を正確に予測することは、果樹の栽培管理や病虫害防除等の適期管理にとって重要である。福島県農業総合センター果樹研究所（以下、当研究所）では、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（現・国立研究開発法人農業・食品技術総合研究機構果樹茶業研究部門）の杉浦らが作成した自発休眠覚醒モデル¹⁾と当研究所の観測（気象・発育）データ（1976～2000年）を用いて発育速度モデルを構築し、2001年に発育予測システム「DVRによる果樹の発芽・開花予測プログラムVer3.1」²⁾及び「DVRによるモモ・あかつき」の硬核期・収穫期予測プログラムVer12」³⁾を作成した。現在は、当システムで発育予測を行い、リアルタイムの発育情報を産地へ提供している。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書（IPCC,2013）⁴⁾によると、大気中の温室効果ガス濃度の上昇によって全球の年平均地上気温が1986～2005年平均と比較して2081～2100年平均では0.3℃～4.8℃上昇すると予測されている。わが国の農業生産のうち、果樹生産については今世紀半ばまでにリンゴ及びウンシュウミカンの大規模な産地移動が指摘される⁵⁾など、甚大な影響が予想される。

近年の地球温暖化等の気象変動の影響は、果樹において開花期の前進として現れ、樹種によって反応は異なるものの成熟期の前進や遅延が起きている⁶⁾。農業気象災害としては、常緑果樹やイチジクの凍害が減少しているが、その他の樹種では増加傾向にある⁶⁾など、わが国の果樹生産に大きく関わっている。

本県では、最近の温暖化傾向に伴う果樹生育の変化としてモモとニホンナシの発芽日の前進傾向を報告し、DVRプログラムを用いた解析により、近年の秋～春期の気温上昇は低温要求に対し抑制的に作用し、自発休眠覚醒の後進化をもたらす一方で、覚醒後の気温上昇は発育速度に促進的に作用し、自発休眠覚醒の遅れを打ち消していることを示した⁷⁾。

今回、当システムについて、モデル構築後の2001年から2015年の観測（気象・発育）データを用い、気温上昇傾向における適合性について検証を行った。

2 試験方法

(1) 気象変動の影響解析

当研究所（福島県福島市飯坂町平野）において、1976～2015年に観測した気象データ（最高・最低・平均気温）及びモモ・あかつき、ニホンナシ・幸水、

リンゴ・ふじの発育データ（発芽・開花・満開・収穫盛日）を用い、気象変動と発育の関連性を解析した。

気象観測地点は、当研究所ほ場（N 37° 48' 49", E 140° 26' 38"）に置き、気象観測装置により測定した。発育データは、モモでは樹齢6年生から23年生の'あかつき'4樹について、ニホンナシでは樹齢9年生から48年生の'幸水'2樹について、リンゴでは樹齢11年生から49年生の'ふじ'2～4樹について、発芽日、開花日、満開日、収穫日を調査した。発芽日は、モモでは長～中果枝の頂芽（葉芽）の鱗片が破れ、幼葉の先端が見え始めた日、ニホンナシでは短果枝花芽の鱗片が破れ、中の蕾が見え始めた日、リンゴでは短果枝花芽の鱗片の先端が破れ、中の緑色が見え始めた日とした。開花日は、連続して開花を始める最初の日とした。満開日は、モモ及びニホンナシでは全花の開花率が80%に達した日、リンゴでは頂芽の中心花と側花を含めて、開花率が80%に達した日とした。収穫日は、連続して収穫される最初の日（赤玉、トビ玉など異常成熟果は含まない）を収穫始日とし、果実の収穫率が50%を超えた日を収穫盛日とした。

(2) 発芽・開花予測モデルの検証

当研究所で開発した発育予測システム「DVRによる果樹の発芽・開花予測プログラムVer3.1」²⁾に、当研究所において2001～2015年に観測した気象データ（最高・最低気温）を入力して得られた予測値とモモ・あかつき、ニホンナシ・幸水、リンゴ・ふじの発育データ（発芽・開花・満開日）実測値の比較により、モデル構築後の当プログラムの適合性を検証した。

2001年に開発したシステムは以下の通りである。発育速度モデルは、杉浦らが作成した自発休眠覚醒モデル（DVR₁）¹⁾と当研究所の観測データから統計的に算出した発芽日から開花日までの発育モデル（DVR₂）により作成した。DVR₁モデルは、各温度域の自発休眠覚醒に必要な時間の逆数を発育速度（DVR）として、毎時間ごとのDVRを積算したDVI（ Σ DVR）の値が1になった時点转自発休眠完了とし、モモ・あかつきでは'白鳳'のモデルを、ニホンナシ・幸水及びリンゴ・ふじでは'幸水'のモデルを適用した（図1, 2）。DVR₂モデルは、気温の影響を受けやすく、高温条件で進行が早まる自発休眠から開花までのモデルを気温の関数として表したものであり、毎時の気温を指数関数により毎時のDVRに変換するモデルである（図3, 4, 5）。開発時の解

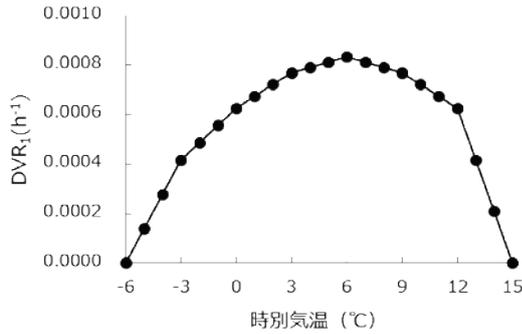


図1 モモ'白鳳'の自発休眠覚醒 (DVR₁) モデル

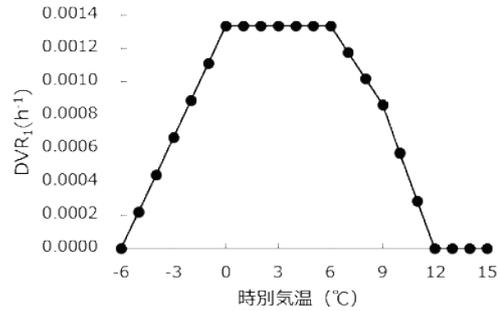


図2 ナシ'幸水'の自発休眠覚醒 (DVR₁) モデル

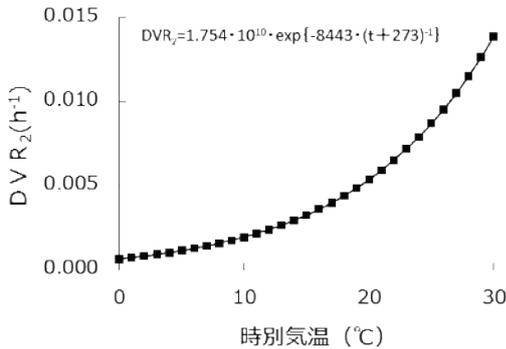


図3 モモ'あかつき'のDVR₂モデル

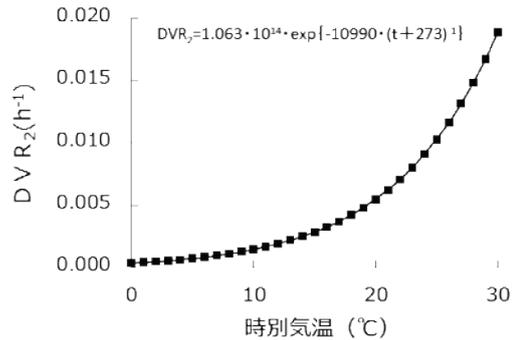


図4 ナシ'幸水'のDVR₂モデル

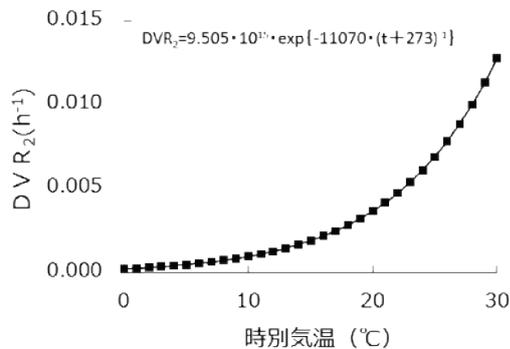


図5 リンゴ'ふじ'のDVR₂モデル

析に使用したデータは、当研究所の1976～2000年の気象データ (最高・最低気温) 及び発育データ (発芽・開花日) である。また、気温は、sin曲線 (和田ら: 1972)⁸⁾ により最高・最低気温から特別気温を推定し、解析に供した。

特別気温推定: 最高・最低気温からsin曲線 (1972: 和田ら)⁸⁾ により算出。

$$t = (t_{\max} - t_{\min}) \sin 2(\pi h / 2H) + t_{\min} \quad \dots (式 1)$$

t: 特別気温、h: 時刻、t_{min}: 日最低気温、t_{max}: 日最高気温、H=9

DVRモデル: 1976～2000年の発芽日からの特別気温データと開花日までのDVR₂モデルを算出。

$$DVR = A \cdot \exp \{-B \cdot (t+273)^{-1}\} \quad \dots (式 2)$$

A、B: 定数、t: 特別気温 (°C)

DVRモデルは、発芽の実測日を起算日として開花日のDVIの変動係数が最小となる様にパラメータBを設定し、かつ、開花日のDVIが1となるようにパラメータAを設定した。

(3) 収穫予測モデルの検証

当研究所で開発した発育予測システム「DVRによるモモ'あかつき'の硬核期・収穫期予測プログラムVer12」³⁾ に、当研究所において2001～2015年に観測した気象データ (最高・最低気温) を入力して得られた予測値とモモ'あかつき'の発育データ (硬核開始・収穫開始・収穫盛日) 実測値の比較により、モデル構築後の当プログラムの適合性を検証した。

2001年に開発したシステムは以下の通りである。発育速度モデルは、当研究所の観測データから統計的に算出した満開日から硬核開始日までの発育モデル (DVR₃) と硬核開始日から収穫開始日までの発育モデル (DVR₄) により作成した。DVR₃モデルは、満開から硬核期頃までの発育は温度依存性が高く、特別気温に対して指数関数的にDVRが大きくなるモデルである (図6)。DVR₄モデルは、硬核期以降は温度依存性が徐々に小さくなるため、ほぼ直線に近いモデルである (図7)。

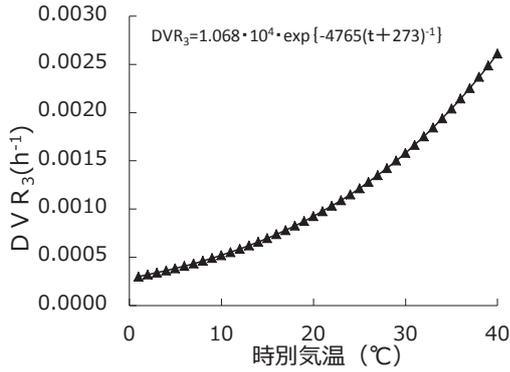


図6 モモ‘あかつき’の硬核開始日までのDVR₃モデル

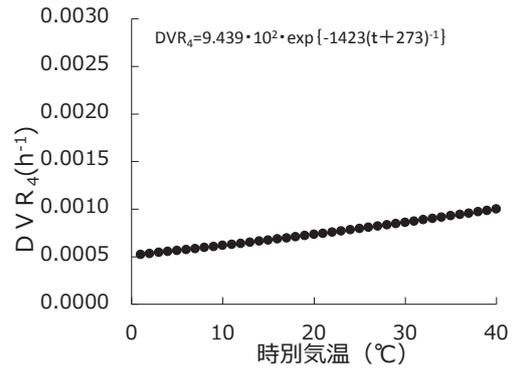


図7 モモ‘あかつき’の硬核開始日からのDVR₄モデル

開発時の解析に使用したデータは、当研究所の1989～2000年の気象データ（最高・最低気温）及び果実発育データ（硬核開始・収穫開始・収穫盛日）である。また、気温は、sin曲線（式1）（和田ら：1972）⁸⁾により最高・最低気温から特別気温を推定し、解析に供した。

DVRモデル：1989～2000年の満開日からの特別気温データと硬核開始日までのDVR₃モデル、硬核開始日から収穫盛期日までのDVR₄モデルを算出。

$$DVR = A \cdot \exp \{-B \cdot (t+273)^{-1}\} \quad \dots (式3)$$

A、B：定数、t：特別気温（°C）

DVRモデルは、実測日のDVIの変動係数が最小となる様にパラメータBを設定した。DVR₃モデルは硬核開始日のDVIが、DVR₄モデルは収穫開始日のDVIが1となるようにパラメータAを設定した。

3 試験結果及び考察

(1) 気温上昇の影響解析

観測地点における1976～2015年の最高気温、平均気温、最低気温は、年次変動が大きいものの、上昇する傾向が認められた（図8）。1976～2015年の最高気温、平均気温、最低気温の平均値はそれぞれ17.9°C、12.8°C、8.2°Cであり、そのうち2001～2015年は18.4°C、13.1°C、8.5°Cであった。回帰式から推定される気温の上昇割合は、最高気温が年0.037°C、

最低気温が年0.034°C、平均気温が年0.028°Cであり、特に最高気温及び最低気温の上昇割合が高い傾向が認められた。2001～2015年の間で生育期間の平均気温が高かった上位3年は2004年、2007年、2010年であり、上位3年の平均気温は13.7°C（他年平均12.9°C）であった（表1）。

発芽日については、モモ‘あかつき’で年0.21日、ニホンナシ‘幸水’で年0.16日、リンゴ‘ふじ’で年0.17日の割合で前進する傾向が認められた（図9、10、

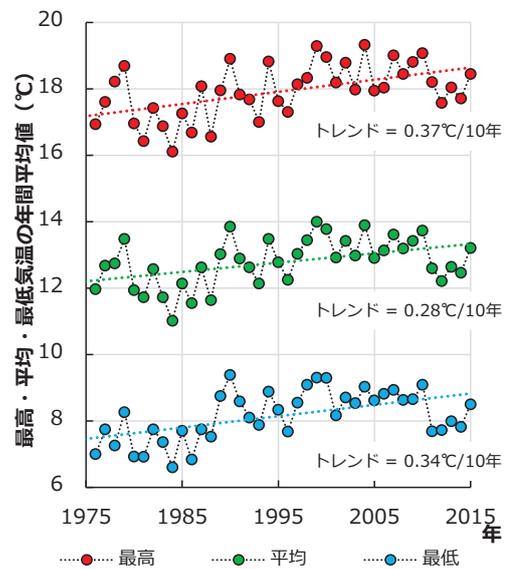


図8 年間平均気温の推移（福島果樹研）

トレンドは、最小二乗法による回帰直線の傾きを10年単位で表現したもの（以下の図も同様）。

表1 生育期間（前年10月1日～当年9月30日）の平均気温の年次推移（2001～2015年）（°C）

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
平均気温	13.0	13.5	12.5	13.8	13.3	12.7	13.7	13.1	13.3	13.6	12.9	12.2	12.4	12.7	12.7
最高気温	18.2	19.0	17.5	19.2	18.3	17.5	19.0	18.3	18.8	19.0	18.5	17.7	17.8	17.8	18.0
最低気温	8.3	8.6	8.1	8.9	8.9	8.5	9.1	8.6	8.5	8.9	8.1	7.7	7.6	8.2	8.0

※ DVR予測式では、生育期間の開始日を自発休眠導入期の10月1日としている。

※ 下線は2001～2015年における平均気温の上位3年を示す。

表2 生育ステージの長期変化傾向を示す回帰直線の有意性

	モモ あかつき	ニホンナシ 幸水	リンゴ ふじ
発芽日	0.1740 **	0.1305 *	0.1318 *
開花日	0.0720 ns	0.1029 *	0.0684 ns
満開日	0.0333 ns	0.0192 ns	0.0799 ns
収穫始日	0.1367*	0.1132*	0.0812 ns
収穫盛日	0.1785 **	0.2304 **	0.1648 *

※ 表中の値は、最小二乗法を用いた回帰直線の決定係数。
 ※ **, *は危険率1%、5%水準で有意差あり。nsはなし。

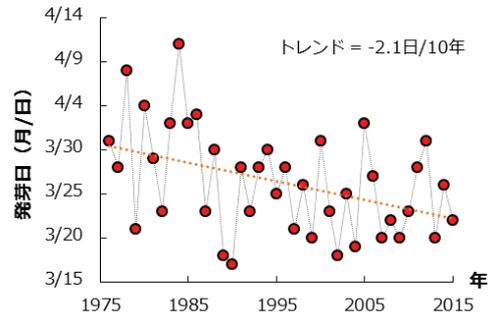


図9 モモ「あかつき」発芽日

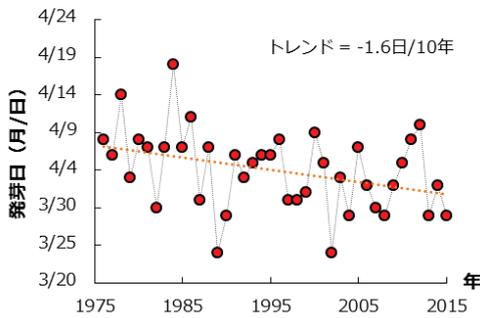


図10 ナシ「幸水」発芽日

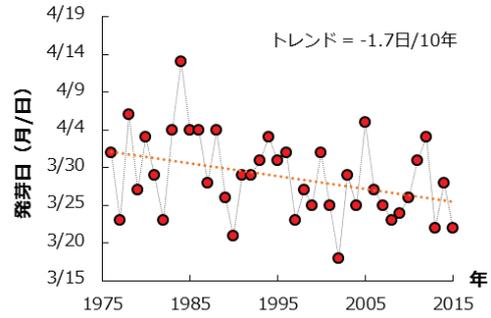


図11 リンゴ「ふじ」発芽日

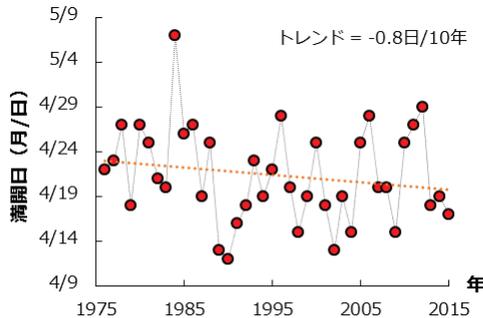


図12 モモ「あかつき」満開日

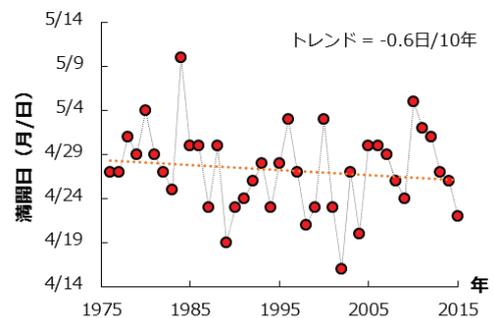


図13 ナシ「幸水」満開日

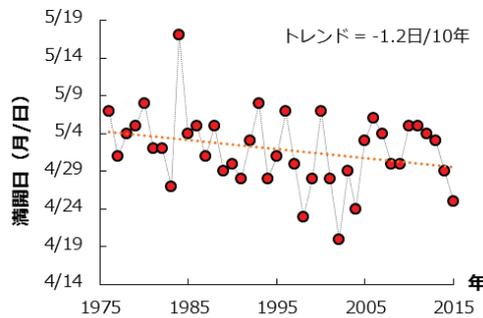


図14 リンゴ「ふじ」満開日

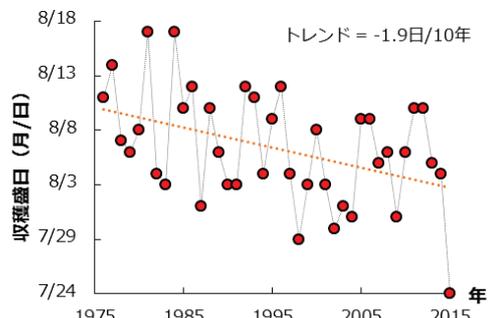


図15 モモ「あかつき」収穫盛日

11, 表2)。

満開日については、明瞭な傾向は認められなかった(図12, 13, 14, 表2)。

収穫盛日については、モモ「あかつき」で年0.19日、

ニホンナシ「幸水」で年0.17日の割合で前進する傾向が認められたが、リンゴ「ふじ」については、年0.19日の割合で遅延する傾向が認められた(図15, 16, 17, 表2)。

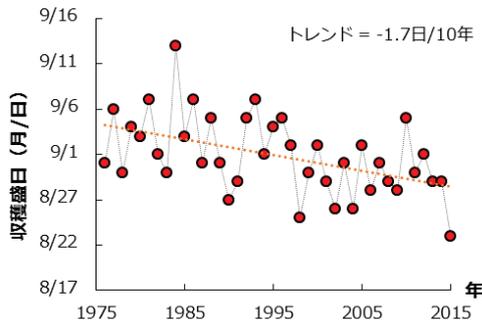


図16 ナシ「幸水」収穫盛日

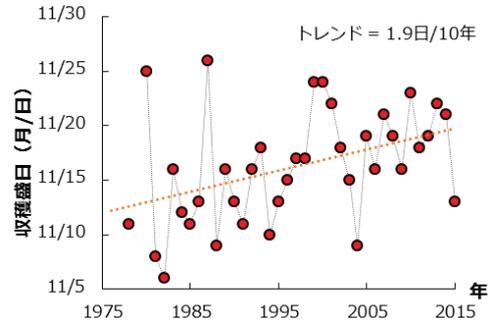


図17 リンゴ「ふじ」の収穫盛日

永山・志村⁷⁾は、最近の温暖化傾向に伴うモモとニホンナシの発芽日の前進傾向を報告し、近年の秋期から春期の気温上昇は低温要求に対し抑制的に作用し、自発休眠覚醒の遅延をもたらす一方で、覚醒後の気温上昇は発育速度に促進的に作用するため、結果として発芽日の前進を促していることを示唆している。一方、満開日に明瞭な傾向が見られなかったことは、さらに検証する必要がある。

収穫日について、杉浦ら⁶⁾は果樹における温暖化の影響には大きく2つの類型があるとしている。ニホンナシやモモ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、リンゴは開花期が前進する一方で、必ずしも収穫期は前進しない果実生育期遅延タイプに分類されており、果皮の着色が収穫の判断に影響する後者では、収穫期の前進と遅延の両方が報告されている。したがって、モモやニホンナシの収穫が夏期に集中する一方で、リンゴ晩生種「ふじ」は晩秋に収穫されるため、収穫期の高温が着色不良を招き、結果として収穫を遅らせる結果となっていると推察された。

(2) 発芽・開花予測モデルの検証

モモ「あかつき」の発育予測では、2001～2015年の推定誤差(RMSE:平均2乗誤差の平方根)が発芽で2.6日、開花で2.0日、満開で2.9日であり、システム作成時(1976～2000年)の誤差(2.1日, 1.8日, 1.5日)に比べ、発芽日及び満開日で約1日大きかった(表3)。また、最大誤差は発芽で5.0日、開花で4.0日、満開で5.0日であり、システム作成時(1976～2000年)の誤差(4.0日, 4.0日, 3.0日)に比べ、発芽日で1日、満開日で2日大きかった(表3, 図18, 19)。田村⁹⁾は、生育ステージ予測において、予測誤差が実測値の年次変動の標準偏差以下であれば、実用的に意味のある予測と言えるとしている。当システムの予測誤差は、年次変動の標準偏差(4.5日, 2.9日, 3.0日)

に比べて発芽日で2日、開花日で1日、満開日で0日小さかった。このことから、モモにおける当予測システムの実用性が確認された。

ニホンナシ「幸水」の発育予測では、2001～2015年の推定誤差が発芽で1.6日、開花で1.8日、満開で2.2日であり、システム作成時(1976～2000年)の誤差(1.8日, 1.1日, 1.7日)に比べ、開花日で約1日大きかった(表4)。また、最大誤差は発芽で3.0日、開花で4.0日、満開で4.0日であり、システム作成時(1976～2000年)の誤差(5.0日, 2.0日, 6.0日)に比べ、発芽日及び満開日で2日小さく、開花日で2日大きかった(表4, 図20, 21)。当システムの予測誤差は、年次変動の標準偏差(4.6日, 3.4日, 3.6日)に比べて発芽日で3日、開花日で1日、満開日で2日小さかった。このことから、ニホンナシにおける当予測システムの実用性が確認された。

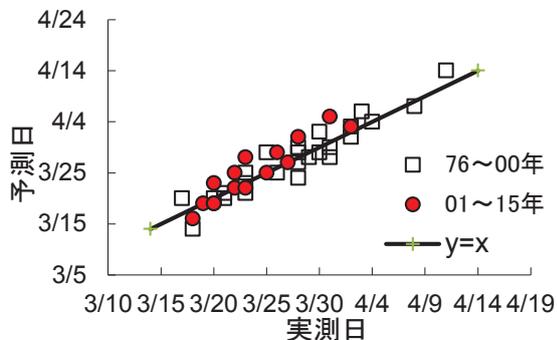
リンゴ「ふじ」の発育予測では、2001～2015年の推定誤差が発芽2.0日、開花で1.6日、満開で1.7日であり、システム作成時(1976～2000年)の誤差(2.3日, 1.2日, 0.9日)に比べ約1日大きかった(表5)。また、最大誤差は発芽で5.0日、開花で3.0日、満開で3.0日であり、システム作成時(1976～2000年)の誤差(8.0日, 3.0日, 2.0日)に比べ、発芽日で3日小さく、満開日で1日大きかった(表5, 図22, 23)。当システムの予測誤差は、年次変動の標準偏差(4.8日, 4.2日, 4.3日)に比べて発芽日で3日、開花日及び満開日で2日小さかった。このことから、リンゴにおける当予測システムの実用性が確認された。

2001～2015年の観測期間の中で、比較的気温の高かった上位3年(2004年, 2007年, 2010年)における予測モデルの誤差は、モモ「あかつき」で0～4日、ニホンナシ「幸水」及びリンゴ「ふじ」で0～3日であり、他の調査年と比較して差異は認められなかった(表1, 3, 4, 5)。このことから、当予測システムは高温年においても適応可能と判断された。

表3 DVRによるモモ‘あかつき’の発芽・開花予測

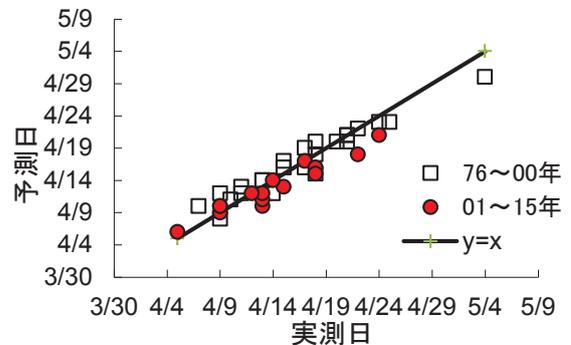
データ	年	発芽			開花			満開		
		実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差
予測システム基礎データ	1976	3/31	3/28	3	4/18	4/20	-2	4/22	4/24	-2
	1977	3/28	3/29	-1	4/17	4/16	1	4/23	4/21	2
	1978	4/8	4/7	1	4/24	4/23	1	4/27	4/27	0
	1979	3/21	3/21	0	4/11	4/12	-1	4/18	4/19	-1
	1980	4/4	4/4	0	4/21	4/21	0	4/27	4/27	0
	1981	3/29	3/28	1	4/21	4/20	1	4/25	4/24	1
	1982	3/23	3/23	0	4/15	4/16	-1	4/21	4/21	0
	1983	4/2	4/1	1	4/15	4/17	-2	4/20	4/22	-2
	1984	4/11	4/14	-3	5/4	4/30	4	5/7	5/6	1
	1985	4/2	4/3	-1	4/21	4/21	0	4/26	4/25	1
	1986	4/3	4/6	-3	4/22	4/22	0	4/27	4/25	2
	1987	3/23	3/21	2	4/13	4/14	-1	4/19	4/19	0
	1988	3/30	4/2	-3	4/20	4/20	0	4/25	4/25	0
	1989	3/18	3/14	4	4/7	4/10	-3	4/13	4/15	-2
	1990	3/17	3/20	-3	4/9	4/8	1	4/12	4/12	0
	1991	3/28	3/30	-2	4/13	4/14	-1	4/16	4/18	-2
	1992	3/23	3/25	-2	4/9	4/12	-3	4/18	4/19	-1
	1993	3/28	3/24	4	4/17	4/19	-2	4/23	4/24	-1
	1994	3/30	3/29	1	4/15	4/16	-1	4/19	4/19	0
	1995	3/25	3/29	-4	4/18	4/15	3	4/22	4/21	1
1996	3/28	3/27	1	4/25	4/23	2	4/28	4/26	2	
1997	3/21	3/20	1	4/10	4/11	-1	4/20	4/17	3	
1998	3/26	3/25	1	4/11	4/13	-2	4/15	4/16	-1	
1999	3/20	3/20	0	4/14	4/12	2	4/19	4/17	2	
2000	3/31	3/30	1	4/18	4/18	0	4/25	4/23	2	
予測結果	2001	3/23	3/28	-5	4/13	4/10	3	4/18	4/14	4
	2002	3/18	3/16	2	4/5	4/6	-1	4/13	4/10	3
	2003	3/25	3/25	0	4/15	4/13	2	4/19	4/17	2
	2004	3/19	3/19	0	4/9	4/9	0	4/15	4/14	1
	2005	4/2	4/3	-1	4/17	4/17	0	4/25	4/22	3
	2006	3/27	3/27	0	4/22	4/18	4	4/28	4/24	4
	2007	3/20	3/19	1	4/9	4/10	-1	4/20	4/16	4
	2008	3/22	3/22	0	4/13	4/11	2	4/20	4/16	4
	2009	3/20	3/19	1	4/9	4/10	-1	4/15	4/14	1
	2010	3/23	3/22	1	4/18	4/16	2	4/25	4/23	2
	2011	3/28	4/1	-4	4/18	4/15	3	4/27	4/22	5
	2012	3/31	4/5	-5	4/24	4/21	3	4/29	4/26	3
	2013	3/20	3/23	-3	4/13	4/12	1	4/18	4/17	1
	2014	3/26	3/29	-3	4/14	4/14	0	4/19	4/19	0
	2015	3/22	3/25	-3	4/12	4/12	0	4/17	4/17	0
1976~2000年		3/28	3/28	2.1	4/17	4/17	1.8	4/22	4/22	1.5
2001~2015年		3/24	3/25	2.6	4/14	4/13	2.0	4/21	4/18	2.9

※集計値は、実測日および予測日は平均値、誤差は推定誤差(RMSE)。



推定誤差: 76~00年 2.1日、01~15年 2.6日
最大誤差: 76~00年 4.0日、01~15年 5.0日

図18 モモ‘あかつき’の発芽予測



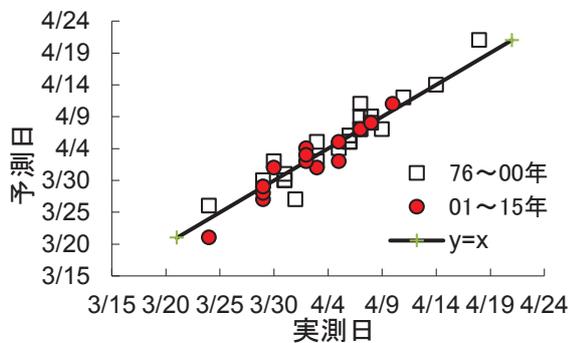
推定誤差: 76~00年 1.8日、01~15年 2.0日
最大誤差: 76~00年 4.0日、01~15年 4.0日

図19 モモ‘あかつき’の開花予測

表4 DVRによるニホンナシ'幸水'の発芽・開花予測

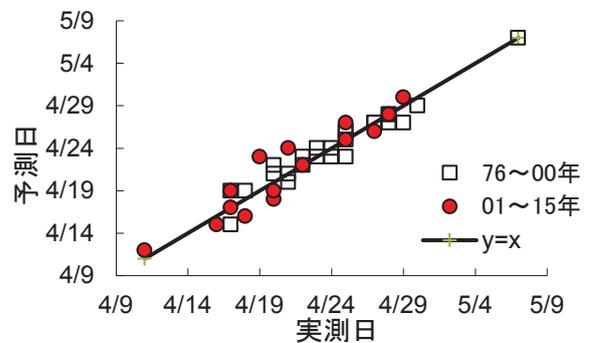
データ	年	発芽			開花			満開		
		実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差
予測システム基礎データ	1976	4/8	4/9	-1	4/25	4/25	0	4/27	4/29	-2
	1977	4/6	4/5	1	4/23	4/23	0	4/27	4/26	1
	1978	4/14	4/14	0	4/28	4/27	1	5/1	5/1	0
	1979	4/3	4/5	-2	4/24	4/24	0	4/29	4/28	1
	1980	4/8	4/8	0	4/30	4/29	1	5/4	5/4	0
	1981	4/7	4/7	0	4/25	4/26	-1	4/29	4/29	0
	1982	3/30	4/2	-3	4/24	4/23	1	4/27	4/26	1
	1983	4/7	4/7	0	4/22	4/23	-1	4/25	4/25	0
	1984	4/18	4/21	-3	5/7	5/7	0	5/10	5/9	1
	1985	4/7	4/9	-2	4/27	4/27	0	4/30	5/1	-1
	1986	4/11	4/12	-1	4/28	4/28	0	4/30	5/2	-2
	1987	3/31	3/30	1	4/21	4/21	0	4/23	4/23	0
	1988	4/7	4/11	-4	4/27	4/27	0	4/30	4/30	0
	1989	3/24	3/26	-2	4/17	4/15	2	4/19	4/20	-1
	1990	3/29	3/30	-1	4/17	4/19	-2	4/23	4/25	-2
	1991	4/6	4/6	0	4/20	4/21	-1	4/24	4/25	-1
	1992	4/3	4/2	1	4/23	4/24	-1	4/26	4/27	-1
	1993	4/5	4/4	1	4/25	4/26	-1	4/28	5/4	-6
	1994	4/6	4/5	1	4/20	4/22	-2	4/23	4/25	-2
	1995	4/6	4/6	0	4/25	4/23	2	4/28	4/27	1
1996	4/8	4/9	-1	4/28	4/28	0	5/3	5/1	2	
1997	3/31	3/30	1	4/22	4/22	0	4/27	4/27	0	
1998	3/31	3/31	0	4/18	4/19	-1	4/21	4/21	0	
1999	4/1	3/27	5	4/21	4/20	1	4/23	4/23	0	
2000	4/9	4/7	2	4/29	4/27	2	5/3	5/1	2	
予測結果	2001	4/5	4/5	0	4/17	4/17	0	4/23	4/20	3
	2002	3/24	3/21	3	4/11	4/12	-1	4/16	4/15	1
	2003	4/3	4/1	2	4/20	4/18	2	4/27	4/23	4
	2004	3/29	3/29	0	4/16	4/15	1	4/20	4/18	2
	2005	4/7	4/7	0	4/25	4/25	0	4/30	4/28	2
	2006	4/2	4/4	-2	4/27	4/26	1	4/30	4/30	0
	2007	3/30	4/1	-2	4/22	4/22	0	4/29	4/28	1
	2008	3/29	3/27	2	4/20	4/19	1	4/26	4/23	3
	2009	4/2	4/2	0	4/18	4/16	2	4/24	4/20	4
	2010	4/5	4/2	3	4/29	4/30	-1	5/5	5/3	2
	2011	4/8	4/8	0	4/25	4/27	-2	5/2	5/1	1
	2012	4/10	4/11	-1	4/28	4/28	0	5/1	4/30	1
	2013	3/29	3/28	1	4/19	4/23	-4	4/27	4/29	-2
	2014	4/2	4/3	-1	4/21	4/24	-3	4/26	4/27	-1
	2015	3/29	3/29	0	4/17	4/19	-2	4/22	4/23	-1
1976~2000年		4/5	4/5	1.8	4/24	4/24	1.1	4/28	4/28	1.7
2001~2015年		4/2	4/2	1.6	4/21	4/21	1.8	4/27	4/25	2.2

※集計値は、実測日および予測日は平均値、誤差は推定誤差(RMSE)。



推定誤差: 76~00年 1.8日、01~15年 1.6日
最大誤差: 76~00年 5.0日、01~15年 3.0日

図20 ニホンナシ'幸水'の発芽予測



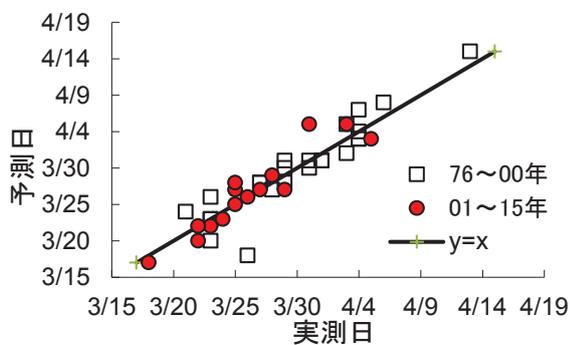
推定誤差: 76~00年 1.1日、01~15年 1.8日
最大誤差: 76~00年 2.0日、01~15年 4.0日

図21 ニホンナシ'幸水'の満開予測

表5 DVRによるリンゴ‘ふじ’の発芽・開花予測

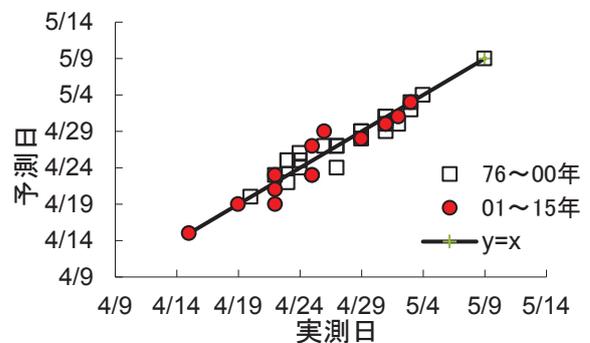
データ	年	発芽			開花			満開		
		実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差
予測システム基礎データ	1976	4/1	3/31	1	5/1	4/29	2	5/7	5/8	-1
	1977	3/23	3/26	-3	4/27	4/24	3	5/1	4/30	1
	1978	4/6	4/8	-2	5/1	4/30	1	5/4	5/4	0
	1979	3/27	3/28	-1	4/29	4/28	1	5/5	5/5	0
	1980	4/3	4/5	-2	5/3	5/3	0	5/8	5/7	1
	1981	3/29	3/31	-2	4/29	4/29	0	5/2	5/3	-1
	1982	3/23	3/23	0	4/29	4/29	0	5/2	5/3	-1
	1983	4/4	4/3	1	4/24	4/26	-2	4/27	4/28	-1
	1984	4/13	4/15	-2	5/9	5/9	0	5/17	5/17	0
	1985	4/4	4/4	0	5/1	5/1	0	5/4	5/3	1
	1986	4/4	4/7	-3	5/1	5/1	0	5/5	5/5	0
	1987	3/28	3/27	1	4/23	4/25	-2	5/1	4/30	1
	1988	4/4	4/3	1	5/1	5/1	0	5/5	5/4	1
	1989	3/26	3/18	8	4/22	4/23	-1	4/29	4/30	-1
	1990	3/21	3/24	-3	4/23	4/25	-2	4/30	4/30	0
	1991	3/29	3/30	-1	4/24	4/24	0	4/28	4/28	0
	1992	3/29	3/28	1	4/27	4/27	0	5/3	5/2	1
	1993	3/31	3/30	1	5/4	5/4	0	5/8	5/9	-1
	1994	4/3	4/1	2	4/24	4/25	-1	4/28	4/30	-2
	1995	3/31	3/31	0	4/27	4/27	0	5/1	5/1	0
1996	4/1	3/31	1	5/3	5/2	1	5/7	5/7	0	
1997	3/23	3/23	0	4/26	4/27	-1	4/30	4/30	0	
1998	3/27	3/28	-1	4/20	4/20	0	4/23	4/22	1	
1999	3/23	3/20	3	4/23	4/22	1	4/28	4/27	1	
2000	4/1	3/31	1	5/2	4/30	2	5/7	5/5	2	
予測結果	2001	3/25	3/27	-2	4/22	4/19	3	4/28	4/26	2
	2002	3/18	3/17	1	4/15	4/15	0	4/20	4/18	2
	2003	3/29	3/27	2	4/25	4/23	2	4/29	4/28	1
	2004	3/25	3/25	0	4/19	4/19	0	4/24	4/23	1
	2005	4/5	4/3	2	4/29	4/28	1	5/3	5/1	2
	2006	3/27	3/27	0	5/2	5/1	1	5/6	5/5	1
	2007	3/25	3/28	-3	4/29	4/28	1	5/4	5/2	2
	2008	3/23	3/22	1	4/25	4/23	2	4/30	4/29	1
	2009	3/24	3/23	1	4/22	4/21	1	4/30	4/28	2
	2010	3/26	3/26	0	5/3	5/3	0	5/5	5/5	0
	2011	3/31	4/5	-5	5/1	4/30	1	5/5	5/5	0
	2012	4/3	4/5	-2	5/1	4/30	1	5/4	5/4	0
	2013	3/22	3/20	2	4/26	4/29	-3	5/3	5/6	-3
	2014	3/28	3/29	-1	4/25	4/27	-2	4/29	5/1	-2
	2015	3/22	3/22	0	4/22	4/23	-1	4/25	4/27	-2
1976~2000年	3/30	3/30	2.3	4/28	4/28	1.2	5/3	5/3	0.9	
2001~2015年	3/26	3/27	2.0	4/26	4/25	1.6	4/30	4/30	1.7	

※集計値は、実測日および予測日は平均値、誤差は推定誤差(RMSE)。



推定誤差: 76~00年 2.3日、01~15年 2.0日
最大誤差: 76~00年 8.0日、01~15年 5.0日

図22 リンゴ‘ふじ’の発芽予測



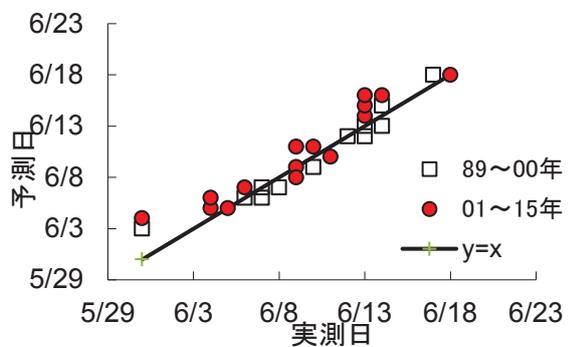
推定誤差: 76~00年 1.2日、01~15年 1.6日
最大誤差: 76~00年 3.0日、01~15年 3.0日

図23 リンゴ‘ふじ’の開花予測

表6 DVRによるモモ‘あかつき’の硬核期、収穫期予測

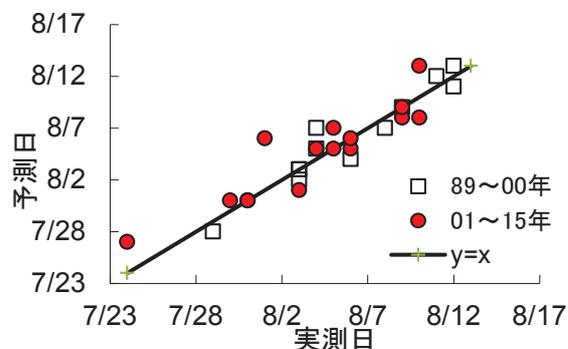
データ	年	硬核開始			収穫始め			収穫盛り		
		実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差	実測日	予測日	誤差
予測システム基礎データ	1989	6/7	6/6	-1	8/2	8/1	-1	8/6	8/4	-2
	1990	6/6	6/6	0	7/30	7/29	-1	8/3	8/2	-1
	1991	6/7	6/7	0	7/31	7/31	0	8/3	8/3	0
	1992	6/14	6/13	-1	8/9	8/7	-2	8/12	8/11	-1
	1993	6/14	6/15	1	8/9	8/9	0	8/11	8/12	1
	1994	6/10	6/9	-1	8/1	8/1	0	8/4	8/5	1
	1995	6/13	6/13	0	8/7	8/6	-1	8/9	8/9	0
	1996	6/17	6/18	1	8/9	8/9	0	8/12	8/13	1
	1997	6/12	6/12	0	8/1	8/4	3	8/4	8/7	3
	1998	5/31	6/3	3	7/24	7/25	1	7/29	7/28	-1
	1999	6/8	6/7	-1	7/30	7/31	1	8/3	8/3	0
2000	6/13	6/12	-1	8/3	8/3	0	8/8	8/7	-1	
予測結果	2001	6/6	6/7	-1	7/30	7/29	1	8/3	8/1	2
	2002	6/4	6/5	-1	7/25	7/28	-3	7/30	7/31	-1
	2003	6/9	6/9	0	7/31	8/3	-3	8/1	8/6	-5
	2004	6/5	6/5	0	7/27	7/27	0	7/31	7/31	0
	2005	6/13	6/14	-1	8/4	8/5	-1	8/9	8/8	1
	2006	6/14	6/16	-2	8/3	8/6	-3	8/9	8/9	0
	2007	6/9	6/11	-2	8/2	8/2	0	8/5	8/5	0
	2008	6/10	6/11	-1	8/1	8/2	-1	8/6	8/5	1
	2009	6/4	6/6	-2	7/28	7/27	1	7/31	7/31	0
	2010	6/13	6/15	-2	8/3	8/3	0	8/6	8/6	0
	2011	6/13	6/16	-3	8/5	8/5	0	8/10	8/8	2
	2012	6/18	6/18	0	8/7	8/10	-3	8/10	8/13	-3
	2013	6/11	6/10	1	8/2	8/3	-1	8/5	8/7	-2
	2014	6/9	6/8	1	7/29	8/1	-3	8/4	8/5	-1
	2015	5/31	6/4	-4	7/21	7/24	-3	7/24	7/27	-3
1976~2000年		6/10	6/10	1.2	8/3	8/3	1.2	8/6	8/6	1.3
2001~2015年		6/9	6/10	1.8	7/31	8/1	2.0	8/4	8/5	2.0

※集計値は、実測日および予測日は平均値、誤差は推定誤差(RMSE)。



推定誤差: 89~00年 1.2日、01~15年 1.8日
最大誤差: 89~00年 3.0日、01~15年 4.0日

図24 モモ‘あかつき’の硬核開始日予測



推定誤差: 89~00年 1.3日、01~15年 2.0日
最大誤差: 89~00年 3.0日、01~15年 5.0日

図25 モモ‘あかつき’の収穫盛日予測

(3) 収穫予測モデルの検証

モモ‘あかつき’における硬核期開始日予測では、2001~2015年の推定誤差が1.8日、最大誤差が4.0日であり、システム作成時(1989~2000年)の誤差(1.2日、3.0日)に比べ約1日大きかったが、当システムの予測誤差は、年次変動の標準偏差(2.4日)に比べて約1日小さく、当予測システムの実用性が確認された(表6、図24)。

収穫期予測では、2001~2015年の推定誤差が収穫開始日及び収穫盛日ともに2.0日であり、システム作成時(1989~2000年)の誤差(1.2日、1.3日)に比べ約1日大きかった(表6)。また、最大誤差は収穫開始日で3.0日、収穫盛日で5.0日であり、システム作成時(1989~2000年)の誤差(3.0日、3.0日)に比べ、収穫盛日で2日大きかった(表6、図25)。当システムの予測誤差は、年次変動の標準偏差(1.4日、1.7日)に比べて収穫開始日で1日大きかった。

2001～2015年の観測期間の中で、比較的気温の高かった上位3年(2004年, 2007年, 2010年)における予測モデルの誤差は、硬核期開始日で0～2日、収穫開始日及び収穫盛日で0日であり、当モデルについては、高温年においても適応可能と判断された(表1, 6)。

収穫開始日及び収穫盛日の予測誤差が大きかった2003年、2012年、2015年は、核障害等による軟質果が多く、人為的に収穫を早めた経過があり、特異的な年であったと考えられた。現在、当プログラムによる予測値の情報提供に当たっては、核障害等の発生状況を併せて掲載し、適期収穫のための留意点としている。

4 摘要

1976～2000年の観測データを基に構築したDVRによる発芽、開花、収穫の予測システムについて、2001～2015年の適合性を検証した。1976～2015年の最高気温、平均気温、最低気温の平均値はそれぞれ17.9℃、12.8℃、8.2℃であり、そのうち2001～2015年は18.4℃、13.1℃、8.5℃であった。2001～2015年の間で生育期間の平均気温が高かった上位3年は2004年、2007年、2010年であり、上位3年の平均気温は13.7℃、他年の平均気温は12.9℃であった。この気温上昇傾向において、モモ、ニホンナシ、リンゴの発芽期は年0.21日、0.16日、0.17日の割合で前進する傾向が認められた。収穫期ではモモ、ニホンナシで年0.19日、0.17日の割合で前進する一方、リンゴ・ふじについては、年0.19日の割合で遅延する傾向が認められた。モモ、ニホンナシ、リンゴのDVRモデルを用いた予測システムは、モデル構築後の2001年から2015年の発育予測においてその実用性が確認された。また、生育期に比較的気温の高かった上位3年においても適合性が認められた。

謝 辞

本試験の論文作成にあたり、本試験供試樹の栽培管理をする上で御助力いただいた歴代の栽培科職員及び農場管理員、臨時職員の皆様に深く感謝します。

引用文献

- 1) 杉浦俊彦. 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. 1997. 京都大学学位論文.
- 2) 志村浩雄・増子俊明・沢田吉男. 発育速度 (DVR) モデルによる果樹 (モモ・ナシ・リンゴ) の発芽・

- 開花予測技術の開発. 2001. 福島県研究成果情報.
- 3) 志村ら. モモ「あかつき」の硬核期の特定と果実発育のモデル化. 2001. 園学雑. 70 (別2): 222.
- 4) IPCC. 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書. 2013.
- 5) 杉浦俊彦・横沢正幸. 年平均気温の変動から推定したリンゴ及びウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響. 2004. 園学雑. 73: 72-78.
- 6) 杉浦俊彦・黒田治之・杉浦裕義. 温暖化がわが国の果樹生育に及ぼしている影響の現状. 2007. 園学研. 6: 257-263.
- 7) 永山宏一・志村浩雄. 最近の温暖化傾向に伴う果樹生育の変化. 2009. 日本農業気象学会2009年全国大会.
- 8) 和田道宏・村上利男. 気温の日変化に関する研究階層別気温出現時間の算出方法. 1972. 東北の農業気象. 17: 34-36.
- 9) 田村良文. 作物の新しい発育ステージ予測法—ノンパラメトリック法の紹介—. 1989. 農業および園芸. 64 (9): 1043-1048.

