

# 福島盆地の大規模凍霜害事例における 果樹の発育ステージ・凍霜害危険度のモデル予測

近 内 翔\*<sup>1</sup>・梶 野 瑞 王\*<sup>2</sup>・渡 邊 明\*<sup>3</sup>・日 下 博 幸\*<sup>4</sup>

## 要 旨

落葉果樹3種(モモ“あかつき”, ニホンナシ“幸水”, リンゴ“ふじ”)を対象に, 果樹の凍霜害リスクを予測し, その手法の精度検証を行った。果樹の凍霜害危険度は発育ステージ(発芽期, 開花期など)によって異なるため, はじめに, 果樹の発育予測モデルにより, 果樹の発芽日や展葉日, 開花日を予測した。次に, 凍霜害危険度予測モデルにより, 2021年4月に福島盆地で発生した大規模な果樹の凍霜害を対象に予測実験を行い, モデルで予測した凍霜害危険度と実際の被害状況を比較した。その結果, 福島盆地内の多くの地点で, モデルで予測した凍霜害危険度は実際の被害状況と整合した。凍霜害危険度が高い地点は, 市街地外の川沿いの低地に多く分布していることが明らかになった。被害分布の形成要因として, 福島市街地のヒートアイランドによる夜間の気温低下抑制と福島盆地内の小地形に対応した冷気湖の影響が考えられる。

## 1. はじめに

福島県は日本国内でも有数の果樹の生産地であり, その栽培面積は, モモが1554ha, リンゴが886ha, ニホンナシが568ha, カキが593ha, ブドウが226ha, オウトウが56haである(農林水産省 2021)。福島県の中でも, 福島市を中心とする福島盆地は特に果樹栽培が盛んであり, 福島県全体の果樹の栽培面積のうち福島市は, モモが38.3%, リンゴが45.5%, ニホンナシが56.3%, カキが3.03%, ブドウが25.2%, オウトウが58.9%を占めている(農林水産省 2021)。2021年には福島県で果樹の大規模な凍霜害が発生し, 福島県全体では27.9億円, 福島市では5.3億円の被害が出るなど, 深刻な経済被害が発生した(福島県 2022; 福島民友社 2021)。凍霜害の防止策には燃焼資材の燃焼(以下, 燃

焼法)や防霜ファンの稼働があるが(大谷 2016), これらの対策を実施していたにも関わらず2021年には大規模な被害が生じた。果樹の凍霜害リスクは果樹の休眠中にはほとんどなく, 発芽後に大きくなるといわれており(佐久間ほか 2013; 萩原ほか 2011), 今後, 温暖化によって年平均気温が2°C程度上昇した場合, 東北地方南部では凍霜害リスクが増加すると予測されている(Masaki 2020)。これは, 温暖化により果樹の生育が早まり, 遅霜による被害を受けやすくなるためである。

凍霜害リスクと気象要素を関連付けるためには, 果樹の発育状況を予測する発育予測モデルと, 各発育ステージにおける凍霜害の危険度を予測する凍霜害危険度予測モデルの両方が必要である。果樹の発育予測のために, 志村ほか(2001)はモモ“あかつき”とニホンナシ“幸水”, リンゴ“ふじ”の発育状況を予測するDVR(Developmental Rate)モデルを構築した。杉浦ほか(1991)と杉浦・本條(1997)はニホンナシ“幸水”のDVRモデルを構築した。Asakura(2011)はリンゴ“ふじ”のGDH(Growing Degree Hours)モデルを構築した。一方, 佐久間ほか(2013)は果樹の凍霜害危険度を予測するロジスティック回帰モデルを

\*1 (連絡責任著者) 筑波大学理工情報生命学術院。

konnai.kakeru.tg@alumni.tsukuba.ac.jp

\*2 気象庁気象研究所/筑波大学生命環境系。

\*3 福島大学/気候変動研究所。

\*4 筑波大学計算科学研究センター。

—2022年12月6日受領—

—2023年4月3日受理—

構築した。しかし、発育予測モデルと凍霜害危険度予測モデルを組み合わせて凍霜害危険度を予測する手法の精度検証は十分には行われていない。また、日本国内での実際の凍霜害を対象とした凍霜害危険度の面的な評価も行われていない。

本研究では、福島盆地における主要果樹であるモモ、ニホンナシ、リンゴの3種類について、凍霜害リスクを予測する手法の精度を検証することを目的とする。本研究の新規性は、福島盆地における主要果樹について複数の発育モデルを評価し、また危険度予測値と実際の被害状況を面的に比較したことにある。

## 2. 使用データ・手法

### 2.1 使用データ

#### 2.1.1 気象データ

本研究では、発育予測モデルと凍霜害危険度予測モデルの入力値として、福島県福島市の福島県農業総合センター果樹研究所（以下、福島果樹研）圃場（37°48.8'N, 140°26.6'E, 標高102m）で観測された地上気温（1分値）から作成した前1時間平均値を使用した。また気象庁の福島地方気象台（以下、福島地台）露場（37°45.5'N, 140°28.2'E, 標高67m）、梁川アメダス（37°51.1'N, 140°35.3'E, 標高43m）で観測された地上気温データ（1時間値）を使用した。各地点の位置

は第1図の四角印で示す。期間は2014年10月1日から2021年5月31日までの7年間である。

またこれらに加えて、凍霜害危険度予測モデルの精度検証のために、大規模な凍霜害が発生した2021年4月11日、27日の福島盆地内6か所の果樹園の日最低気温データを使用した（第1図の丸印AからF）（福島県 2022）。各果樹園の日最低気温データは、NTT東日本の「eセンシング For アグリ」により得られた値である。

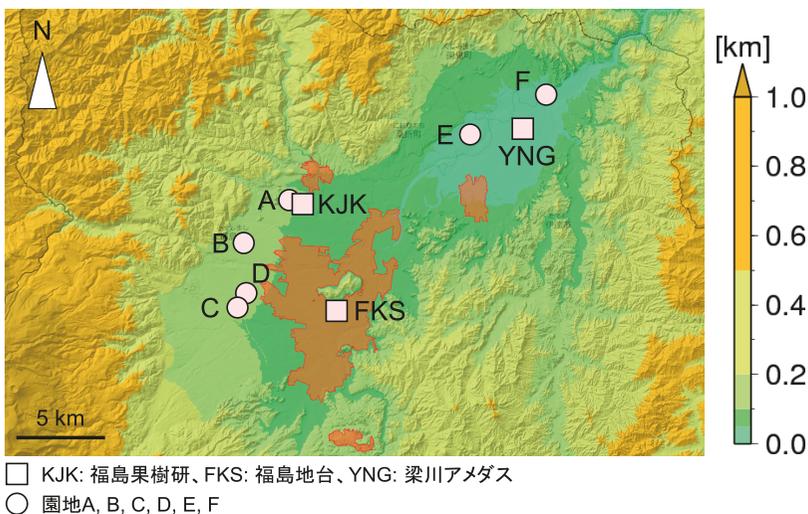
#### 2.1.2 果樹の発育データ

果樹の発育データとして、福島果樹研で観測されたモモ“あかつき”、ニホンナシ“幸水”の発芽日、開花日のデータを使用した。また、リンゴ“ふじ”の発芽日、展葉日、開花日のデータを使用した（<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36021a/nogyo-nousin-gijyutu03.html#kazyu>, 2022.11.08閲覧）。また、凍霜害危険度予測モデルの精度検証のために、上記6か所の果樹園における2021年4月11日、27日時点での各果樹の発育状況と被害率のデータ（福島県 2022）を使用した。

### 2.2 手法

本研究では、福島盆地における気温の観測値を既存の発育予測モデルに入力することで予測した発育ステージを、実際に観測された発育データにより検証

し、モデルの有用性を評価した（第2図）。また、凍霜害危険度の予測実験を行い、実際の被害状況と比較した。落葉果樹は、秋から冬にかけての自発休眠期を経て、春の気温上昇に従い発芽、展葉、開花する。これを踏まえ、本研究でははじめに自発休眠が終了する日（自発休眠覚醒日）を予測し、発芽日、展葉日、開花日を予測した。予測した発芽日、展葉日、開花日は、観測値と比較・検証した。果樹の耐凍性は発育ステージによって異なる。そのため次に、発育予測モデルにより予測した発育ステージを用いて凍霜害危険度を予



第1図 福島盆地の標高と観測地点（KJK: 福島果樹研、FKS: 福島地台、YNG: 梁川アメダス、A: 平野福内、B: 笹谷、C: 上野寺、D: 笹木野、E: 伊達崎、F: 東大枝）。人口集中地区（Densely Inhabited District, 総務省統計局 2022）。国土地理院地図（<https://maps.gsi.go.jp/>, 2022.11.22閲覧）に2020年時点での人口集中地区を赤茶色で重ねた。

測した。最後に、予測した凍霜害危険度を観測値と比較・検証した。

2.2.1 果樹の発育予測モデル

福島果樹研で栽培されているモモ“あかつき”，ニホンナシ“幸水”，リンゴ“ふじ”の発育ステージの予測のために、志村ほか(2001)によるDVRモデル(以下、SH01モデル)，杉浦ほか(1991)によるDVRモデル(以下、SU91モデル)，Asakura(2011)によるGDHモデル(以下、AS11モデル)を使用した。モデルの入力値は2.1.1節で述べた地上気温の1時間値である。モデルの式やパラメータは、全て上記の文献中に記載されているものを使用した。モデルの出力値は発芽・展葉・開花に至った月・日(整数値)である。

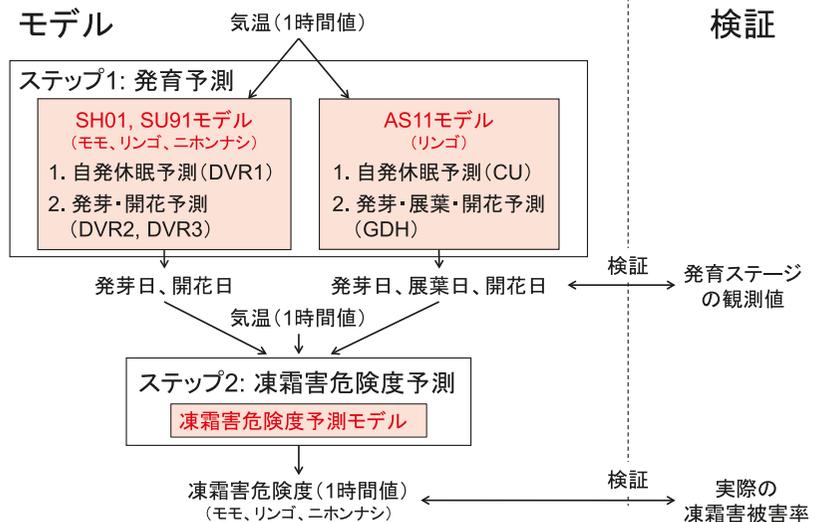
2.2.1.1 SH01モデル

このモデルではモモ“あかつき”，ニホンナシ“幸水”，リンゴ“ふじ”について、自発休眠覚醒モデル(DVR1)と発芽日までの発育モデル(DVR2)，開花日までの発育モデル(DVR3)の3つのサブモデルを用いて、発芽日と開花日を予測する。各発育ステージはDVRの時間積算値DVI(Developmental Index)で評価する。

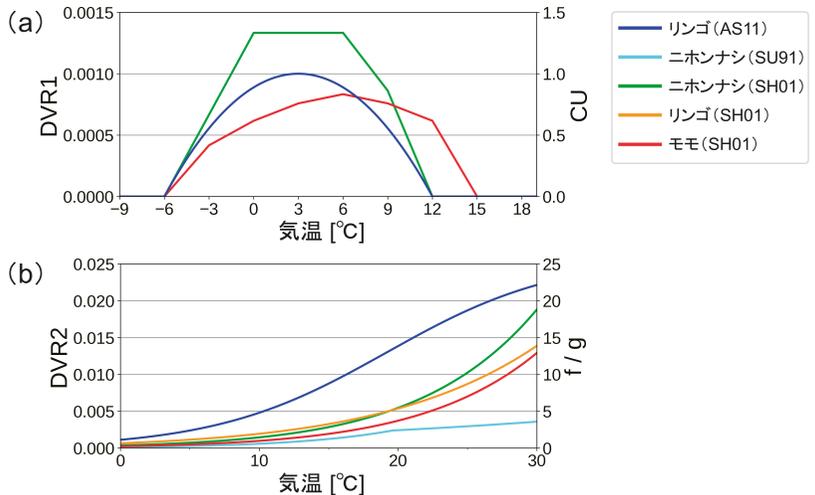
はじめに杉浦ほか(2010)のDVR1モデルにより、気温の1時間値を用いて自発休眠覚醒日を予測する。モモ“あかつき”とニホンナシ“幸水”，リンゴ“ふじ”のDVR1を第3図aに示す。なお、志村ほか(2001)や安達ほか(2018)に基づ

き、リンゴ“ふじ”の自発休眠覚醒日の計算にはニホンナシ“幸水”のDVR1モデルを使用した。このDVR1モデルにより、1時間ごとのDVR1の値が求められる。

自発休眠からの覚醒は、DVR1を時間積算したDVIIの値で判断する。予測する発芽日、開花日の年の前年



第2図 果樹の発育予測と凍霜害危険度予測，モデル精度検証の流れ。



第3図 各果樹の (a) DVR1・CU と気温の関係，(b) DVR2・f/g と気温の関係。青色の線はAS11モデルでのリンゴ“ふじ”のCU・f/g と気温の関係である。水色の線はSU91モデルでのニホンナシ“幸水”，黄緑色の線はSH01モデルでのニホンナシ“幸水”，オレンジ色の線はSH01モデルでのリンゴ“ふじ”，赤色の線はSH01モデルでのモモ“あかつき”のDVR1・DVR2と気温の関係である。なお、リンゴ“ふじ”のDVR1モデルはニホンナシ“幸水”のDVR1と同じ関数を用いた。

の10月1日0時を計算開始時とし、このときのDVIIを0とする。気温の1時間値を用いてDVR1を時間積算し、DVIIが1に達した時点で果樹は自発休眠から覚醒したものとする。

発芽日はDVR2モデルを用いて予測する。このモデルでは、果樹が自発休眠から覚醒したときを起点としてDVI2の計算を行う。モモ“あかつき”，ニホンナシ“幸水”，リンゴ“ふじ”のDVR2を第3図bに示す。DVI2もDVIIと同様にDVR2を積算し求める。モモ“あかつき”，ニホンナシ“幸水”，リンゴ“ふじ”は、それぞれDVI2が2.182, 1.742, 1.098に達した時点を発芽日とする。

開花日はDVR3モデルを用いて予測する。果樹が発芽したときを起点としてDVI3の計算を行う。DVR3の式はDVR2の式と同じである。DVIIやDVI2と同様に、DVR3を時間積算してDVI3を求める。DVI3が1に達した時点で果樹は開花したものとする。

### 2.2.1.2 SU91モデル

このモデルではニホンナシ“幸水”について、自発休眠覚醒モデル(DVR1)と開花日までの発育モデル(DVR2)を用いて、開花日を予測する。用いたDVR1モデル(杉浦・本條 1997; 杉浦ほか 2003)はSH01モデルと同じである(第3図a)。前年の10月1日0時を起点としてDVIIが1に達した日を自発休眠覚醒日とする。

開花日はDVR2モデルを用いて予測する。DVR2を第3図bに示す。SH01モデルと同様に、自発休眠からの覚醒時を起点としてDVR2の時間積算を行い、DVI2が1に達した時点で果樹は開花したものとする。

### 2.2.1.3 AS11モデル

このモデルではリンゴ“ふじ”の発芽日と展葉日、開花日を計算する。このモデルでは、チルユニット(CU)という値を用いて、果樹の自発休眠の進行を評価する。自発休眠期後以降は積算発育温度(GDH)という値を用いて、開花までの果樹の発育を評価する。

CUは気温が $-6^{\circ}\text{C}$ 以上 $12^{\circ}\text{C}$ 未満のときのみ獲得し、それ以外の気温のもとでは値は0をとる。CUの式を第3図aに示す。CUの値を時刻ごとに積算することで、累積チルユニット(CCU)を求める。CCUは、計算開始時(前年の10月1日0時)からCUを時間積算して求める。CCUが1800に達した日を果樹の自発休眠が完了した日とする。

次にGDHを下記のように計算する。GDHの計算開始日はCCUと同様に前年の10月1日0時である。

$$\text{GDH} = \sum_{h=0}^n f \quad (1)$$

$$f = g \frac{26}{1 + \exp(3.1037 - 0.1617T_a)} \quad (2)$$

$f/g$ の値を第3図bに示す。ここで係数 $g$ はCCUの値によって値が異なり、 $\text{CCU} < 1000$ のとき

$$g = 0$$

$1000 \leq \text{CCU} < 1800$ のとき

$$g = \frac{1}{800}(\text{CCU} - 1000)$$

$1800 \leq \text{CCU}$ のとき

$$g = 1 \quad (3)$$

である。リンゴ“ふじ”の果樹はGDHが3408, 4464, 7575に達した時点でそれぞれ発芽、展葉、開花したものとする。

### 2.2.2 果樹の凍霜害危険度予測モデル

本研究では佐久間ほか(2013)によるロジスティック回帰モデルを用いて、果樹が低温に遭遇した場合の凍霜害危険度を求めた。凍霜害危険度は、ある気温に1時間遭遇した場合に、被害率30%以上の凍霜害が発生する確率で定義する。なお、被害率が30%未満の場合は、着果管理などにより経済的被害は生じないものと仮定している。予測した凍霜害危険度が0.5を超えた場合は果樹の凍霜害リスクが高く、凍霜害対策を講じるべきとされる。このモデルでは、果樹の発育ステージによって係数が異なり、発育ステージごとの果樹の低温への耐性の違いを表している。

凍霜害危険度 $y$ は地上気温 $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]を用いて

$$y = \frac{1}{1 + \exp\{-a(T+b)\}} \quad (4)$$

により求める。果樹と発育ステージごとの係数 $a$ ,  $b$ を第1表に、また凍霜害危険度と気温の関係を第4図にまとめた。係数 $a$ ,  $b$ の値は、佐久間ほか(2013)に記

載されている値を使用した。

3. 結果

3.1 果樹の発育ステージ

3.1.1 モモ “あかつき”

第5図に、SH01モデルを用いて予測した2015年から2021年のモモ “あかつき” の発芽日と開花日の予測値と観測値を示す。第2表には、発芽日、開花日の予測値と観測値の平均値、両者の二乗平均平方根誤差RMSE、相関係数Rをまとめた。発芽日のRMSEは3.91日、開花日のRMSEは4.71日であった。Rは発芽日が0.453、開花日が0.987であった。予測値と観測値の相関は、開花日のみ有意であった(有意水準0.05)。

また、福島地台での発芽日と開花日の予測値は、福島果樹研や梁川アメダスの予測値と比較して2-3日

程度早いという結果になった(第6図)。

3.1.2 ニホンナシ “幸水”

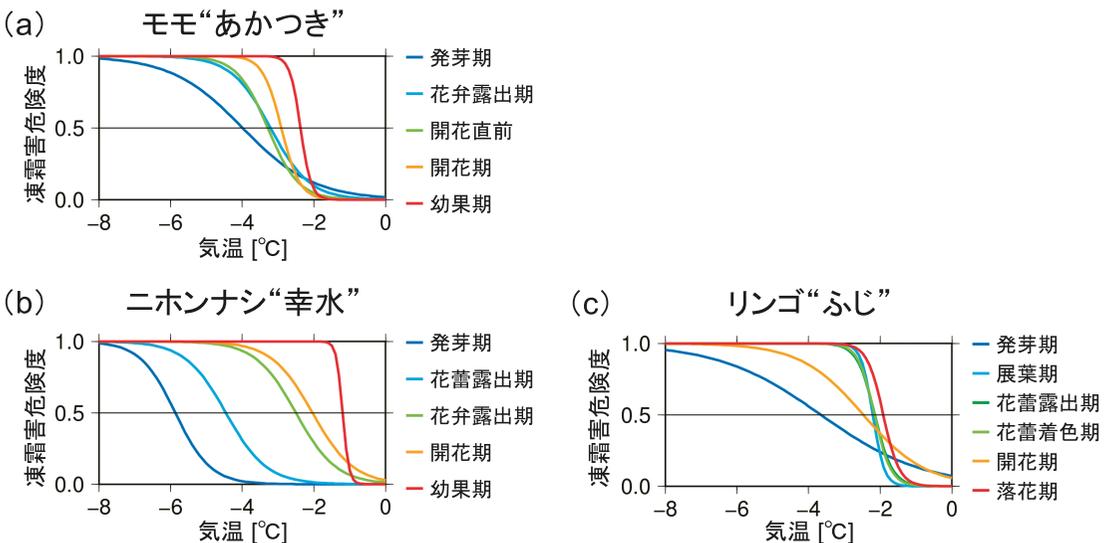
第5図と第2表に、ニホンナシ “幸水” について、SH01モデルとSU91モデルの結果をまとめ、予測値と観測値を比較した。その結果、SH01モデルのRMSEは発芽日が2.48日、開花日が4.17日であり、Rは発芽日が0.822、開花日が0.842であった。予測値と観測値の相関は、発芽日、開花日ともに有意だった。

各地点での発芽日と開花日の予測値を比較すると、日付が早い方から福島地台、梁川アメダス、福島果樹研という順になり、福島地台は他の地点に比べて1-3日程度早かった(第6図b)。

SU91モデルによる開花日予測のRMSEは3.02日、Rは0.755であった(第2表)。予測値と観測値の相関は有意だった。

第1表 各発育ステージでのモモ “あかつき”, ニホンナシ “幸水”, リンゴ “ふじ” の凍霜害危険度予測モデルの係数.

		発芽期	花弁露出期	開花直前	開花期	幼果期	
		モモ	a b	-1.01 -4.03	-1.83 -5.88	-2.32 -7.63	-3.88 -11.29
		発芽期	花蕾露出期	花弁露出期	開花期	幼果期	
		ニホンナシ	a b	-2.04 -11.97	-1.75 -7.80	-1.77 -4.43	-1.74 -3.55
		発芽期	展葉期	花蕾露出期	花蕾着色期	開花期	幼果期
		リンゴ	a b	-0.70 -2.56	-6.19 -13.66	-4.09 -8.80	-4.39 -9.47



第4図 (a) モモ “あかつき”, (b) ニホンナシ “幸水”, (c) リンゴ “ふじ” の各発育ステージにおける気温と凍霜害危険度の関係.

また、SH01モデルの結果と同様に、福島地台での開花日の予測値は他の地点よりも2-3日程度早かった(第6図b)。

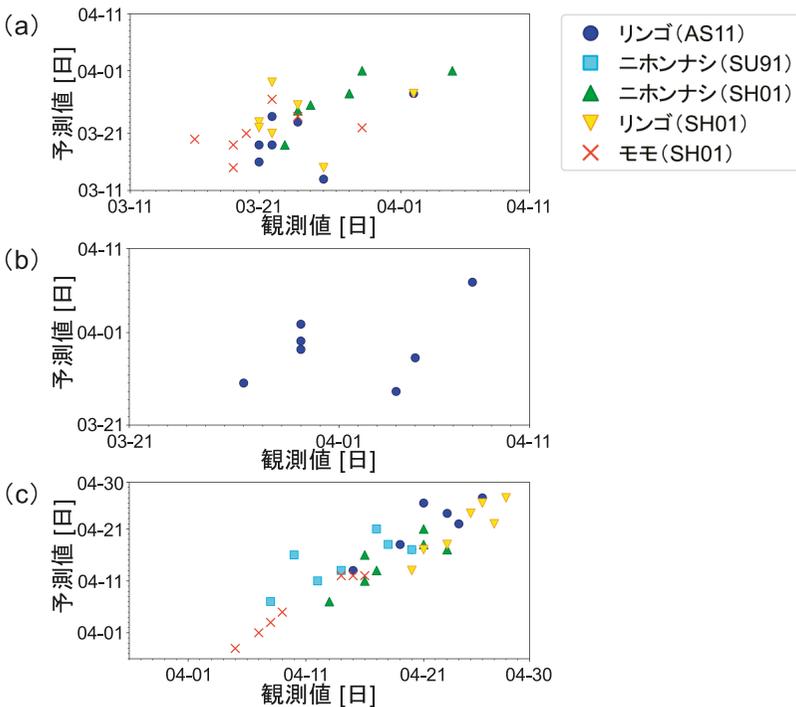
### 3.1.3 リンゴ“ふじ”

第5図と第2表に、リンゴ“ふじ”について、SH01モデルとAS11モデルの結果をまとめた。SH01モデル

のRMSEは発芽日が5.61日、開花日が4.09日であり、Rは発芽日が他の果樹よりも低く0.166、開花日が0.923であった。予測値と観測値の相関は、開花日のみ有意だった。

発芽日と開花日は、日付が早い方から福島地台、梁川アメダス、福島果樹研という順になり、福島地台は他の地点に比べて1-3日早かった(第6図c)。

またAS11モデルのRMSEは発芽日が5.82日、展葉日が4.80日、開花日が2.54日であり、Rは発芽日が0.508、展葉日が0.428、開花日が0.864であった。予測値と観測値の相関は、開花日のみ有意だった。発芽日と開花日の平均値同士の差を見ると、AS11モデルは、SH01モデルや観測値に比べてこれらを早く推定する傾向があった。



第5図 福島果樹研での(a)発芽日、(b)展葉日、(c)開花日の各モデルによる予測値と観測値の比較。縦軸は予測値、横軸は観測値である。

第2表 福島果樹研におけるモモ“あかつき”とニホンナシ“幸水”、リンゴ“ふじ”の各発育ステージ到達日の予測値と観測値の7年間の平均値および両者の二乗平均平方根誤差RMSEと相関係数R。予測した発芽日や開花日は整数値とし、表中の値は3月1日を1とした日付[日]である。

		予測	観測	RMSE	R
モモ (SH01)	発芽	21.1	21.3	3.91	0.453
	開花	41.6	37.1	4.71	0.987
ニホンナシ (SH01)	発芽	27.1	27.6	2.48	0.822
	開花	49.1	45.7	4.17	0.842
ニホンナシ (SU91)	開花	44.4	45.7	3.02	0.755
リンゴ (SH01)	発芽	23.6	24.1	5.61	0.166
	開花	55.3	52.0	4.09	0.923
リンゴ (AS11)	発芽	20.3	24.1	5.82	0.508
	展葉	30.3	32.4	4.80	0.428
	開花	52.1	52.0	2.54	0.864

### 3.2 果樹の凍霜害危険度

本節では7年間の凍霜害危険度の計算結果のうち、実際に福島県で大規模な凍霜害が発生した2021年の結果を示す。

福島県では2021年4月に10-11日、15日、27日と大きく3回の凍霜害が発生し、果樹などに生育不良が発生した(福島県2022)。4月11日には、福島果樹研で燃焼法が実施された。第7図aに福島果樹研と福島地台、梁川アメダスの2021年3月11日から4月30日までの日最低気温の推移を示す。

3月24日、4月11日、15日、27日に日最低気温が

0°Cを下回った地点が見られた。これらのうち、4月11日、15日、27日は、果樹などに凍霜害が発生した日である。

2021年4月の各モデルによる果樹の凍霜害危険度の日最高値の推移を第7図b, c, dに示す。日最低気温が0°Cを下回った地点がある3月24日、4月11日、15日、27日に凍霜害危険度のピークが見られた。しかしながら、全ての果樹で最も凍霜害危険度が高かった4月11日の福島果樹研での凍霜害危険度は、モモ“あかつき”が0.085、ニホンナシ“幸水”がSH01モデルでは0.000018、SU91モデルでは0.064、リンゴ“ふじ”がSH01モデルでは0.099、AS11モデルでは0.000026であった。福島果樹研以外の2地点についても、凍霜害危険度が0.5を超えた日はなかった。実際、福島果樹研での各果樹の被害率は、モモ“あかつき”とニホンナシ“幸水”が0%、リンゴ“ふじ”が12.2%であり、全て被害率30%を下回った。従って、モデルにより予測した各果樹の凍霜害危険度は実際の被害状況と矛盾しない結果といえる。

次に、実際に被害が発生した園地を対象に凍霜害危険度の評価を行った。これらの園地では地上気温の時系列データは得られないが、各果樹の被害率と被害発生時の日最低気温のデータが得られている。第3表に被害率、気温、凍霜害危険度の計算結果、実際の発育

ステージを示す。凍霜害危険度の評価の結果、地点Aを除く全ての地点で、凍霜害危険度が0.5を上回った。また凍霜害の被害率が高い地点ほど、予測した凍霜害危険度の値も大きくなる傾向が見られた。凍霜害危険度が低いKJKやAでは、他の地点と比べて気温が概ね2°C以上高かった。

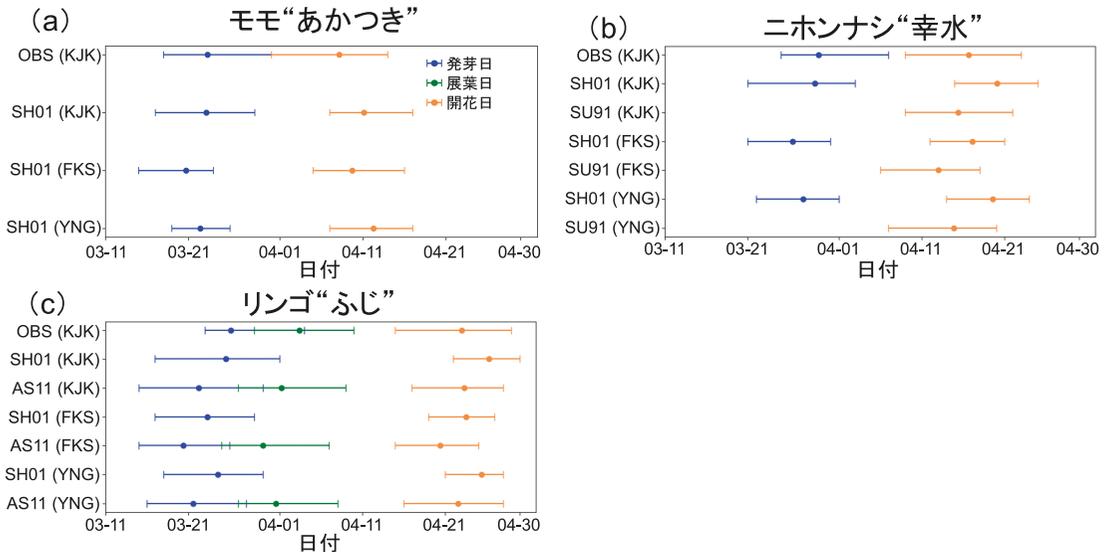
4. 議論

4.1 発育予測モデルの誤差がもたらす凍霜害危険度計算値への影響

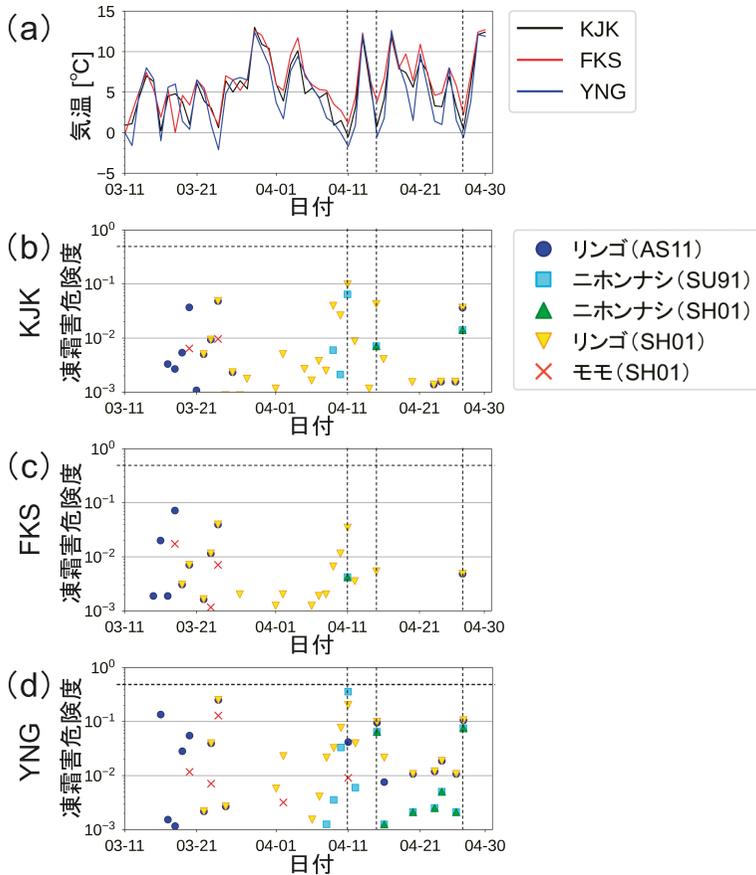
実際に果樹に被害が生じた4月11日の凍霜害事例を対象に、福島果樹研での発育予測モデルの誤差がもたらす影響について考察する。

SH01モデルによるニホンナシ“幸水”の発芽日予測結果を除いて、発芽日と展葉日の予測値と観測値の相関は有意でないため、これらの予測結果を議論できない。しかしながら、2021年4月の凍霜害事例は4月11日のリンゴ“ふじ”の事例を除いて開花期以降に発生している。そのため、開花日の予測値と観測値の相関は有意であることを踏まえると、本研究での発育予測モデルの予測誤差による凍霜害危険度の予測値への影響は限定的であり、凍霜害危険度の予測結果の大部分については議論できると考えられる。

また、第5図、第6図によると、4月11日はモデル、



第6図 (a) モモ“あかつき”, (b) ニホンナシ“幸水”, (c) リンゴ“ふじ”の各発育ステージの観測値と各モデル予測値の比較。エラーバーの左端は7年間で最も早い日、右端は最も遅い日、点は平均日を示す。バーと点の色は青が発芽日、緑が展葉日(リンゴ“ふじ”のみ)、橙が開花日を表す。OBSは観測値である。括弧内は地点名を表す。



第7図 2021年3月中旬から4月にかけての(a)気温の1時間値の日最低値、(b)福島果樹研(KJK)、(c)福島地台(FKS)、(d)梁川アメダス(YNG)での各果樹の凍霜害危険度の日最高値。横破線は凍霜害危険度0.5を、縦破線は凍霜害発生日を示す。

第3表 第1図に示した各園地での(a)4月11日、(b)4月27日の日最低気温と各果樹の実際の被害率、凍霜害危険度の計算結果、実際の発育ステージ。

(a)					
地点	気温	果樹	被害率	凍霜害危険度 計算結果	発育ステージ
KJK	-0.5°C	リンゴ“ふじ”	12.2%	0.001	花蕾着色期
A	-1.6°C	ニホンナシ“幸水”	30-50%	0.317	開花期
B	-4.0°C	ニホンナシ“幸水”	70%以上	0.968	開花期
C	-4.0°C	ニホンナシ“幸水”	50%	0.968	開花期
D	-3.5°C	リンゴ“ふじ”	30-50%	0.763	開花期
E	-5.6°C	ニホンナシ“幸水”	50-70%	0.927	開花期
		モモ“あかつき”	70%以上	1.000	開花期

(b)					
地点	気温	果樹	被害率	凍霜害危険度 計算結果	発育ステージ
C	-2.5°C	ニホンナシ“幸水”	50%	1.000	幼果期
F	-3.7°C	モモ“あかつき”	50%以上	1.000	幼果期

観測ともに全ての果樹で発芽や展葉が完了しているため、開花日の予測誤差が凍霜害予測の上で重要であるといえる。そのため、以下では開花日の予測誤差による影響について議論する。福島果樹研での開花日を比較すると、モデルは観測よりもモモ“あかつき”やニホンナシ“幸水”の開花日を遅く推定する傾向がある。2021年の開花日を比較すると、モモ“あかつき”について、観測では3月30日、SH01モデルでは4月5日であり、4月11日時点では観測、モデルともに開花日を迎えている。ニホンナシ“幸水”については、観測では4月7日、SH01モデルでは4月13日、SU91モデルでは4月7日に開花となっている。そのため、SH01モデルによるニホンナシ“幸水”の発育ステージの予測誤差が凍霜害危険度の値に影響を及ぼしていると考えられる。しかし、仮にSH01モ

デルで予測した福島果樹研でのニホンナシ“幸水”の開花日の誤差が無く、モデルにより求めた発芽日や開花日が観測と同じ日であったとしても、4月11日の凍霜害危険度は0.064となり、危険度の大きな違いは生じない。そのため、2021年4月11日の凍霜害危険度の予測結果に対する果樹の発育ステージの予測誤差による影響は小さいといえる。また、SH01モデルは発芽日と開花日しか予測できないのに対し、AS11モデルはこれらに加えて展葉日も予測できるため、SH01モデルとAS11モデルによるリンゴ“ふじ”の4月11日の凍霜害危険度に違いがあると考えられる。

## 4.2 モデルの精度向上に向けて

### 4.2.1 凍霜害危険度予測モデル

果樹の凍霜害は、霜の発生がなくても低温による植物体の凍結によって発生するため (Rodrigo 2000; 瀬古澤・弦間 2003)、植物体温度が限界温度を下回ったときに凍霜害が発生すると考えられる。本研究で使用した凍霜害危険度予測モデルでは、凍霜害危険度を予測するための変数として気温のみを使用している。このような気温のみを用いる方法は簡便ではあるが、気温と植物体温度の差が大きい場合にはモデルの予測誤差が大きくなることが想定される。近藤 (2011) によれば、放射冷却の強い晴天夜間には、植物体温度と気温の差が最大5°C以上になることもある。そのため、気温のみを用いた凍霜害危険度予測の精度には、植物体温度と気温の差による影響が無視できないと考えられる。植物体温度は気温に加えて風速や相対湿度によっても決まるため (近藤 2011)、これらの気象要素をさらに考慮することで、凍霜害危険度の予測精度の向上が期待できる。

また、本研究では、1時間ごとの凍霜害危険度を予測し、凍霜害リスクを評価した。しかしながら、凍霜害リスクの評価には、果樹が低温にさらされる時間も考慮することも必要だと考えられる。例えば、花芽などの凍結が完了する前に気温が上昇した場合、凍霜害による被害率は低いと言われている (金田ほか 2001)。逆に、同じ気温であっても果樹がより長時間低温にさらされた場合は、凍霜害リスクがより高くなると予想される。そのため、果樹が低温にさらされた時間も凍霜害危険度予測時の変数として使用することで、凍霜害危険度の計算精度をより高めることが期待できる。

なお、凍霜害危険度モデルは果樹の切り枝を恒温器に入れて低温処理した際の花芽の被害率をもとに作成されたものであり、実際の果樹栽培の現場とは果樹の

生育条件や気温の条件が異なる (佐久間ほか 2013)。そのため、これらの条件の差による凍霜害危険度の予測誤差が一定程度生じることが想定される。

### 4.2.2 発育予測モデル

本研究で使用した発育予測モデルでは現在、発芽期と展葉期、開花期しか予測できない。しかし、実際の果樹の発育ステージにはこれらの他に幼果期などもあり (福島県 2022)、特に4月27日 (第3表 b) のように幼果期に凍霜害が発生した事例もある。発育ステージを細かく求めることで実際の果樹の発育状況により即した凍霜害リスクの評価が可能になると考えられる。また温暖化による発育の促進により、幼果期における凍霜害リスクは今より高まるかもしれない。

## 4.3 凍霜害危険度の地点間の差異の要因

### 4.3.1 福島市街地の影響

第7図 a における福島地台の日最低気温の期間平均値 (5.48°C) は、福島果樹研 (4.63°C) や梁川アメダス (3.88°C) と比較して高く、福島地台での凍霜害危険度 (第7図 c) は他の2地点 (第7図 b, d) よりも低い結果となった。福島地台と他2地点の地理的条件を比較すると、福島地台のみ人口集中地区に位置している (総務省統計局 2022)。福島地台での凍霜害危険度が他の2地点と比較して低い原因として、福島市街地での人工排熱等によるヒートアイランドの影響が挙げられる。ヒートアイランドによる福島市街地での夜間の気温低下抑制により、他地点と比較して福島地台の夜間の気温が高くなり、凍霜害危険度が低くなったと考えられる。

### 4.3.2 小地形の影響

第8図に4月11日と4月27日における日最低気温の空間分布を示した。福島市街地の人口集中地区以外の地点についても、地点間で気温や凍霜害危険度の大きな差異が見られた。中でも、地点 A や KJK は他地点と比較して日最低気温が2°C以上高く、凍霜害危険度は概ね0.5以上低かった (第3表)。このような差異をもたらした要因として、小地形の影響が挙げられる。大規模な凍霜害が発生した両日は未明から明け方にかけて晴天で、風も弱かった (福島地台での観測によれば平均風速2 m/s 以下)。従って、放射冷却と冷気流により福島盆地内に冷気湖が形成されており、盆地底の気温は周囲よりも低かったと考えられる。実際に、第3表の中でも気温が低く凍霜害危険度が高かった地点はそれぞれ松川 (B)、須川 (C)、阿武隈川 (E、F) 沿いの低地に位置している。一方で、気温が高く凍霜

害危険度が低かった地点 KJK, A は, これら 2 地点から 1 km ほど北側の小川や摺上川よりも 20m ほど標高の高い段丘の上に位置している。

## 5. 結論

本研究では, 福島盆地における 7 年間の観測データを用いて発育予測モデルの評価を行い, また凍霜害危険度予測モデルを組み合わせて, 2021年4月の大規模凍霜害事例を対象に予測した凍霜害危険度の検証を行った。

モデルを用いて予測した各発育ステージでの凍霜害危険度を予測した結果, 2021年4月の福島果樹研での凍霜害危険度は全ての果樹で0.5に到達せず, この結果は福島果樹研での実際の被害状況と整合的であった。一方で, 凍霜害による被害率が30%以上であった園地での凍霜害危険度は1地点を除いて0.5を超え, 実際の被害状況と概ね整合的であった。

以上を踏まえると, 本研究で用いた手法は, 凍霜害危険度の予測にある程度有用といえる。しかしながら, 一定の誤差を含むため, 発育ステージの細分化や, 凍霜害危険度予測モデルの変数の改良などにより, モ

デルのさらなる精度向上が必要である。

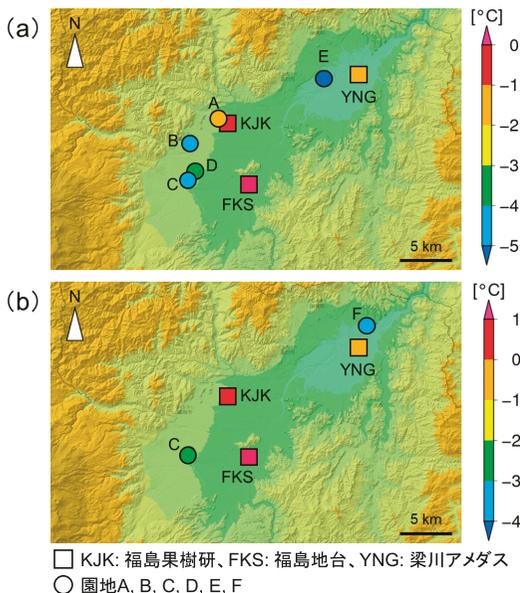
また, 2021年4月の凍霜害発生時の最低気温やモデルで予測した凍霜害危険度の空間分布から, 主に福島市街地から離れた川沿いの低地を中心に凍霜害の被害率が高いことが明らかになった。このような被害分布になった要因として, 福島市街地でのヒートアイランドによる夜間の気温低下抑制と, 小規模な窪地や谷間での冷気の滞留のそれぞれにより生じた地点間での気温差の影響が考えられる。特に, 大多数の果樹園が市街地外に立地していることを踏まえると, 凍霜害発生時, 最低気温や凍霜害被害率の分布は主に小地形に影響されるといえる。

## 謝辞

本研究は日本学術振興会科研費 JP19H01155の助成を受けたものです。研究の遂行にあたって福島県農業総合センター果樹研究所の志村浩雄先生, 佐久間宣昭先生から助言および観測データの提供を受けました。農研機構果樹茶業研究部門の杉浦俊彦先生からも貴重な助言を受けました。また, 2名の査読者と担当編集委員の鈴木パーカー明日香先生からも貴重な助言を受けました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 安達義輝, 志村浩雄, 額田光彦, 齋藤祐一, 桑名 篤, 安部 充, 2018: 温暖化傾向における果樹の発育速度 (DVR) モデルの検証。福島県農業総合センター研究報告, 9, 11-21.
- Asakura, T., 2011: Model prediction of the spring phenology for 'Fuji' apple. Acta Horticulturae, 903, 1135-1140.
- 福島県, 2022: 令和3年度凍霜害の記録。  
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/504015.pdf> (2022.11.08閲覧)
- 福島民友社, 2021: 2021年5月21日朝刊, 26pp.
- 萩原栄揮, 富田 晃, 渡辺晃樹, 新谷勝広, 2011: スモモおよびオウトウの開花期における低温許容限界。山梨県果樹試験場研究報告, 12, 61-66.
- 金田美奈子, 原 慶明, 鈴木 隆, 白石卓夫, 2001: 甘果オウトウの花芽雌ざいにおける低温での障害発生時の温度条件。園芸学会雑誌, 70, 516-518.
- 北村祐人, 沼口孝司, 仲 慶晃, 2020: 花芽の温度要求性モデルを利用したウメ「南高」における開花期予測簡易プログラムの実装。和歌山県農林水産試験研究機関研究報告, 8, 79-84.
- 近藤純正, 2011: 放射冷却—最低気温, 結氷, 夜露—。天気, 58, 75-78.



第8図 第1図と同じ。ただし (a) 2021年4月11日と (b) 4月27日における福島果樹研(KJK), 福島地台(FKS), 梁川アメダス(YNG)の日最低気温と, それぞれの日に実際に凍霜害が発生した園地(A-F)における日最低気温。

Masaki, Y., 2020: Future risk of frost on apple trees in Japan. *Climatic Change*, 159, 407-422.

農林水産省, 2021: 農林業センサス/2020年農林業センサス 確報 第1巻 都道府県別統計書 (福島県).

[https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500209&tstat=000001032920&cycle=7&tclass1=000001147146&tclass2=000001155386&tclass3=000001160949&cycle\\_facet=tclass1%3Atclass2&tclass4val=0](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500209&tstat=000001032920&cycle=7&tclass1=000001147146&tclass2=000001155386&tclass3=000001160949&cycle_facet=tclass1%3Atclass2&tclass4val=0) (2022.11.11閲覧)

大谷義夫, 2016: ニホンナシ園における防霜ファン, 多目的防災網および燃焼資材の組合せによる防霜効果. 栃木県農業試験場研究報告, 74, 9-18.

Rodrigo, J., 2000: Spring frosts in deciduous fruit trees - morphological damage and flower hardiness. *Sci. Horticulturae*, 85, 155-173.

佐久間宣昭, 斎藤祐一, 永山宏一, 2013: 落葉果樹4樹種の凍霜害危険度予測モデル. 園芸学研究, 12, 403-409.

瀬古澤由彦, 弦間 洋, 2003: 果樹の凍霜害防止対策の現状. 植物の生長調節, 38, 240-248.

志村浩雄, 増子俊明, 沢田吉男, 2001: 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. 福島県研究成果情報. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/448387.pdf> (2022.11.08閲覧)

総務省統計局, 2022: 地図で見る統計. <https://jstatmap.e-stat.go.jp/jstatmap/main/trialstart.html> (2022.11.11閲覧)

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.

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.

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, 43-49.

杉浦俊彦, 阪本大輔, 朝倉利員, 杉浦裕義, 2010: モモ‘白鳳’の花芽における温度と自発休眠覚醒効果との関係. *農業気象*, 66, 173-179.

**付録：果樹発育予測モデル**

**A1 SH01モデル**

このモデルではモモ“あかつき”, ニホンナシ“幸水”, リンゴ“ふじ”について, 自発休眠覚醒モデル (DVR1) と発芽日までの発育モデル (DVR2), 開花日までの発育モデル (DVR3) の3つのサブモデルを用いて, 発芽日と開花日を予測する. 各発育ステージは DVR の時間積算値 DVI (Developmental Index) で評価する.

はじめにモモ“あかつき”については杉浦ほか (2010) の DVR1モデルにより, ニホンナシ“幸水”とリンゴ“ふじ”については杉浦・本條 (1997) と杉浦ほか (2003) の DVR1モデルにより, 気温の1時間値を用いて自発休眠覚醒日を予測する. モモ“あかつき”とニホンナシ“幸水”, リンゴ“ふじ”の DVR1モデルを第3図 a に示す. なお, 志村ほか (2001) や安達ほか (2018) に基づき, リンゴ“ふじ”の自発休眠覚醒日の計算にはニホンナシ“幸水”の DVR1モデルを使用した. ニホンナシ“幸水”とリンゴ“ふじ”の DVR1は

$$DVR1=0$$

$-6 \leq T < 0$  のとき

$$DVR1=1.333 \times 10^{-3} + 2.222 \times 10^{-4} T$$

$0 \leq T < 6$  のとき

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

$6 \leq T < 9$  のとき

$$DVR1=2.276 \times 10^{-3} - 1.571 \times 10^{-4} T$$

$9 \leq T < 12$  のとき

$$DVR1=3.448 \times 10^{-3} - 2.874 \times 10^{-4} T$$

$12 \leq T$  のとき

$$DVR1=0 \tag{A1}$$

により求めた. なお,  $T$  は気温の1時間値 [°C] である. モモ“あかつき”の DVR1は

$$DVR1=0$$

$-6 \leq T < -3$  のとき

$$DVR1 = \frac{1}{1200} + \frac{T}{1200 \times 3}$$

$-3 \leq T < 0$  のとき

$$DVR1 = \frac{0.74}{1200} + \frac{0.24T}{1200 \times 3}$$

$0 \leq T < 3$  のとき

$$DVR1 = \frac{0.74}{1200} + \frac{0.17T}{1200 \times 3}$$

$3 \leq T < 6$  のとき

$$DVR1 = \frac{0.82}{1200} + \frac{0.09T}{1200 \times 3}$$

$6 \leq T < 9$  のとき

$$DVR1 = \frac{1.16}{1200} - \frac{0.08T}{1200 \times 3}$$

$9 \leq T < 12$  のとき

$$DVR1 = \frac{1.45}{1200} - \frac{0.18T}{1200 \times 3}$$

$12 \leq T < 15$  のとき

$$DVR1 = \frac{3.7}{1200} - \frac{0.74T}{1200 \times 3}$$

$15 \leq T$  のとき

$$DVR1 = 0$$

(A2)

により求めた。なお、 $T$  は気温の1時間値 [ $^{\circ}\text{C}$ ] である。予測する発芽日、開花日の年の前年の10月1日0時のDVI1を0とし、気温の1時間値を用いてDVR1を時間積算した、 $n$  時間後のDVI1

$$DVI1 = \sum_{h=0}^n DVR1 \quad (A3)$$

が1に達した時点で果樹が自発休眠から覚醒したものと

する。発芽日はDVR2モデルを用いて予測する。このモデルでは、果樹が自発休眠から覚醒したときを起点としてDVI2の計算を行う。モモ“あかつき”のDVR2は

$$DVR2 = 1.754 \times 10^{10} \times \exp\{-8443(T+273)^{-1}\} \quad (A4)$$

により求めた。なお、 $T$  は気温の1時間値 [ $^{\circ}\text{C}$ ] である。ニホンナシ“幸水”のDVR2は

$$DVR2 = 1.063 \times 10^{14} \times \exp\{-10990(T+273)^{-1}\} \quad (A5)$$

により求めた。リンゴ“ふじ”のDVR2は

$$DVR2 = 9.505 \times 10^{13} \times \exp\{-11070(T+273)^{-1}\} \quad (A6)$$

により求めた。DVI2もDVI1と同様に、 $n$  時間後のDVI2

$$DVI2 = \sum_{h=0}^n DVR2 \quad (A7)$$

について、モモ“あかつき”、ニホンナシ“幸水”、リンゴ“ふじ”は、それぞれ2.182、1.742、1.098に達した時点を発芽日とする。

開花日はDVR3モデルを用いて予測する。果樹が発芽したときを起点としてDVI3の計算を行う。DVR3の式はDVR2の式と同じである。 $n$  時間後のDVI3

$$DVI3 = \sum_{h=0}^n DVR3 \quad (A8)$$

が1に達した時点で果樹は開花したものと

#### A2 SU91モデル

このモデルではニホンナシ“幸水”について、自発休眠覚醒モデル(DVR1)と開花日までの発育モデル(DVR2)を用いて、開花日を予測する。用いたDVR1モデル(杉浦・本條 1997; 杉浦ほか 2003)はSH01モデルと同じである(第3図a)。式(3)と同様、前年の10月1日0時を起点としてDVI1が1となったときを覚醒日とする。

開花日はDVR2モデルを用いて予測する。DVR2は  $T < 19.6$  のとき

$$DVR2 = \frac{1}{24} \exp(38.448) \times \exp(-12094(T+273.15)^{-1})$$

$19.6 \leq T$  のとき

$$DVR2 = \frac{1}{24} \exp(9.002) \times \exp(-3473(T+273.15)^{-1}) \quad (A9)$$

により求める。 $T$  は気温の1時間値 [ $^{\circ}\text{C}$ ] である。式(7)と同様、自発休眠からの覚醒時を起点としてDVR2の時間積算を行い、DVI2が1に達した時点で果樹は開花したものと

## A3 AS11モデル

このモデルではリンゴ“ふじ”の発芽日と展葉日、開花日を計算する。このモデルでは、チルユニット (CU) という値を用いて、果樹の自発休眠の進行を評価する。自発休眠期後期以降は積算発育温度 (GDH) という値を用いて、開花までの果樹の発育を評価する。

CU は気温が $-6^{\circ}\text{C}$ 以上 $12^{\circ}\text{C}$ 未満のときにのみ獲得し、それ以外の気温のもとでは値は0をとる。気温が $-6^{\circ}\text{C}$ 以上 $12^{\circ}\text{C}$ 未満のとき、CU は

$$\text{CU} = -\frac{1}{81} \times (T^2 - 6T - 72) \quad (\text{A10})$$

である。T は気温の1時間値 [ $^{\circ}\text{C}$ ] である。CU の値を時刻ごとに積算することで、累積チルユニット (CCU) を求める。計算開始時 (前年の10月1日0時) から n 時間後の CCU は

$$\text{CCU} = \sum_{h=0}^n \text{CU} \quad (\text{A11})$$

である。CCU が1800に達した日を果樹の自発休眠が完了した日とする。

次に GDH を下記のように計算する。GDH の計算開始日

は CCU と同様に前年の10月1日0時である。

$$\text{GDH} = \sum_{h=0}^n f \quad (\text{A12})$$

$$f = g \frac{26}{1 + \exp(3.1037 - 0.1617T_h)} \quad (\text{A13})$$

ここで係数 g は CCU の値によって値が異なり、

CCU < 1000 のとき

$$g = 0$$

1000 ≤ CCU < 1800 のとき

$$g = \frac{1}{800} (\text{CCU} - 1000)$$

1800 ≤ CCU のとき

$$g = 1 \quad (\text{A14})$$

である。リンゴ“ふじ”の果樹は GDH が3408, 4464, 7575 に達した時点でそれぞれ発芽、展葉、開花したものとする。

## Model Prediction of Fruit Tree Growth and Frost Damage Risk in Large-scale Frost Damage Cases in the Fukushima Basin

Kakeru KONNAI<sup>\*1</sup>, Mizuo KAJINO<sup>\*2</sup>,

Akira WATANABE<sup>\*3</sup> and Hiroyuki KUSAKA<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan.

<sup>\*2</sup> Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency/Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba.

<sup>\*3</sup> Fukushima University/Institute for Climate Change.

<sup>\*4</sup> Center for Computational Sciences, University of Tsukuba.

(Received 6 December 2022; Accepted 3 April 2023)

## Abstract

The risk of frost damage to three deciduous fruit trees (peach “AKATSUKI”, Japanese pear “KOUSUI”, and apple “FUJI”) was predicted and the accuracy was verified using observation data. Since the risk of frost damage to trees varies depending on their developmental stages, we first predicted the dates of budding, leaf development, and flowering of the trees using several growth prediction models. Then, we conducted the prediction of frost damage risk for the period when the large-scale frost damage was occurred in the Fukushima Basin in April 2021. The predicted risk was consistent with the observed damage data in several locations in the basin. It was found that the high frost hazard areas were distributed in the lowland areas along the river outside of the urban area. Possible reasons for the distribution of the damaged areas include the effect of higher nighttime temperatures due to the heat island (lower risk) and the effect of cold air lakes corresponding to the small topography within the basin (higher risk).

---