

LPWA 通信を利用した気象観測による 露地ビワ産地の出荷予測システムの開発

後田経雄，山下次郎，中村真也¹⁾，町田 清¹⁾，上村賢一¹⁾，別所重幸²⁾

キーワード：ビワ，DVR，気象観測，LPWA，出荷予測

Development of a Shipment Forecast Model for Open-field Loquat Using LPWA-based
Meteorological Monitoring

Tsuneo USHIRODA, Jiro YAMASHITA, Shinya NAKAMURA, Kiyoshi MACHIDA, Kenichi UEMURA,
Shigeyuki BESSHO

目 次

1. 緒言
 2. 材料および方法
 - 1) 気象データの観測，収集
 - 2) ビワ出荷予測システムの構成
 3. 結果
 - 1) LPWA 通信を利用した気象観測
 - 2) ビワ出荷予測
 4. 考察
 - 1) LPWA 通信技術の有効性と課題
 - 2) 出荷予測システムの精度と汎用性
 - 3) 予測精度向上に向けた課題と展望
 - 4) 収穫予測の活用と展開
 5. 摘要
 6. 引用文献
- Summary

¹⁾有限会社トーワテック，²⁾長崎西彼農業協同組合

本研究は農林水産省「スマート農業技術の開発・実証プロジェクト」（事業実施主体：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）の支援により実施された。

1. 緒言

露地栽培によるビワの生産は、その収穫時期や出荷量が市場価格や販売戦略に直結する。特に、主要産地である長崎半島地域では、収穫タイミングを適切に見極めることで、品質保証と販売競争力の向上が期待される。従来、ビワの収穫期の予測には積算気温や発育速度（Developmental Rate：DVR）を用いたモデルが開発されてきたが、ビワ産地全体の青果出荷時期に関しては、統合的な予測システムの構築がなされていなかった。これは、ビワ生産圃場に標高の高低差があるととも南北に広く分布し、圃場間で気温差が生まれ、産地全体の出荷予測を困難にしていたことによる。

近年、LPWA（Low Power Wide Area，LoRaWAN）通信技術の発展により、農林業分野に

おける低コストかつ省電力な気象データ収集が可能となった（渡邊ら，2021）。本研究では、園地台帳に記載された情報（圃場位置、面積、品種、樹齢等）とLPWAによる気象観測データ（日平均気温）を組み合わせることで、露地ビワの出荷量および出荷時期を推定する予測システムを構築することを目的とした。

本システムは、着房率、寒害減収率、果結果樹面積を説明変数とした重回帰モデルによって出荷量を算出し、DVRを用いて収穫時期を予測することで、産地全体の出荷動態を推定し販売戦略等に資することが可能となる。

なお、本研究には農研機構メッシュ農業気象データを利用した。

2. 材料および方法

1) 気象データの観測，収集

(1) 観測による気象データ

出荷予測に必要なビワ産地の気象データを観測するため、観測装置の開発を進めた。開発する気象観測装置は、月額利用料が不要なことおよび設置場所に商用電源がないことを想定し、電池による測定、測定データの送信ができ、ブラウザ上で表示できることを条件とした。この条件を満たす通信規格、機器を検討した結果、通信規格 LPWA を利用した有限会社トーワテックが開発した PonTsuke が適していると判断した。しかし、LPWA の通信は最大で 10km ほどの通信距離があるとされているものの、ビワ産地のような複雑な地形を有する中山間部においては通信距離が明らかにされておらず、実際にビワ産地に設置し通信距離や観測した気象データの表示方法の検討を行った。

(2) 推定値による気象データ

ビワ産地全体を網羅した気象観測装置の設置が難しいことから、気象観測による実測データに加え、農研機構が提供するメッシュ農業気象データシステム(https://amu.rd.naro.go.jp/wiki_open/doku.php?id=start) から取得した気象推定値も出荷予測のデータとして利用した。このメッシュ農業気象データは、観測日以降の 26 日後までは予報値が提供され、それ以降については平年値が提供される。

2) ビワ出荷予測システムの構成

(1) 生産圃場の属性情報

ビワの生産状況として、長崎西彼農業協同組合長崎びわ部会が管理する圃場数 2600 超の園地台帳から、各圃場の面積、品種、樹齢、地区（圃場位置、産地全体で 60 か所）の属性情報を入手した。

(2) 産地全体の出荷量

ビワ産地の出荷予測を行う上で、出荷予定量を把握することは重要であるが、栽培面積や着房率だけでなく、台風被害や寒害などの気象災害による減収も考慮する必要がある。このため、新たに調査する必要がなく、容易に入手できるデータから出荷量を推定する手法を検討した。2008年～2020年の着房率（長崎県農産園芸課調査）、寒害等の減収率（現地調査）、前年の県ビワ結果樹面積（農林水産省、果樹生産出荷統計）を説明変数、長崎西彼農業協同組合長崎びわ部会の出荷量を目的変数とする重回帰分析を行った。作成した重回帰モデルを用いて出荷量と出荷実績を比較した。

(3) 収穫日予測

収穫日の予測には、「茂木」の DVR による収穫期予測モデル（紺野ら，2020）を使用した。

起算開始日：開花終了日

$$DVR = 0.001073 \times \text{日平均気温} - 0.005788$$

なお、DVR の積算開始日は開花終了日とし、DVR の積算値が 1 に達した日を収穫予測日とした。

「なつたより」など他品種には予測モデル式がないため、品種登録時の特性データより「茂木」との収穫日との差から収穫予測日を求めた（表 1）。

表 1 「茂木」との収穫日の差

品種名	茂木との 収穫日の差
涼 峰	-12日
長崎 早生	-10日
涼 風	-8日
福原 早生	-6日
なつたより	-5日
陽 玉	+5日
白 茂木	+7日

また、起算日である開花終了日は、各圃場の位置や管理等により異なるため、すべての圃場の開花終了日の状況を確認できない。このため、毎年、11月15日前後に県農産園芸課が実施しているビワ花房調査の結果を利用した。本試験では地域ごとに設定した代表的なビワ園地の花房進度（1～9）を調査

した。図 1 に示した花房進度から次式により開花終了日を求め、各地域の開花終了日とした。

$$\text{開花終了日} = 11 \text{月} 15 \text{日} + (\text{8-11月15日の花房進度}) \times 15.2$$



図 1 ビワ花房進度の指標

(4) ビワ出荷予測システム

上記によって得られたデータをもとに、ビワ産地全体の時期別出荷量を簡易に算出する Excel ファイルを作成した。このファイルには、予め圃場毎に地区、面積、品種、樹齢が明記された園地台帳、収穫日の予測する DVR 式等が組み込まれており、以下の条件により 3 日毎の出荷量を予測した。

- ① 収穫日は開花終了日からの発育速度（DVR）の日毎積算値が 1.0 に達した日である。
- ② 発育速度（DVR）は「茂木」の場合、 $0.001073 \times \text{日平均気温} - 0.005788$ で求める。
- ③ 「茂木」以外の品種は、「茂木」との収穫日の差で推定する。
- ④ 園地台帳（小地区、面積、品種、樹齢）の圃場毎に DVR を計算、積算し、1.0 に達した日を最初の収穫日とする。
- ⑤ 圃場毎の出荷量は、品種と樹齢から算出し、10 a 当たり出荷量を面積に乗じて算出する。樹齢別の単収は、4 年生で 50kg/10a、20 年生を 850kg/10a とし、各樹齢別の単収を求め出荷量とした。

⑥出荷日は、収穫日の翌日に30%、最初の収穫日から5日後に50%、8日後に20%を出荷すると想定し圃場毎に出荷量を求める。

毎年、露地ビワの出荷を産地と販売側が情報交換を行う協議会が4月中旬に開催されている。このため市場等への提供を考慮すると、4月上中旬には精度が高い予測が必要となる。そこで、本システムに

より、2020年は4月17日、2021年は4月3日に予測した出荷量を予測し、出荷実績と比較した。2020年は現地での気象観測ができていなかったため、メッシュ農業気象データのみで予測し、2021年は9か所に設置した気象観測装置から得られたデータおよび農研機構メッシュ農業気象データを利用した。

3. 結果

1) LPWA 通信を利用した気象観測

有限会社トーワテックが開発した PonTsuke は、携帯回線を利用せず、充電地で動作し、温度、湿度、転倒マス方式による降水量を1時間ごとに測定し、クラウド上のサーバーにデータを送信できた。一方、LPWA の通信距離は、遮蔽物がない長崎市民の森の橘翔大展望 (32°41'58"N, 129°53'39"E) から長崎西彼農協協同組合茂木支店 (32°42'20"N, 129°54'39"E) の1.7km は通信を確認できたが、遮断物がある場合には、800m の近距離でも通信が不安定となった。このため、太陽光パネルと蓄電池を組み合わせることで電源を確保した LPWA の中継器を新たに開発した (図2)。この中継器を橘翔大展望および茂木支店屋上に配置することで見通しがきかない北浦、飯香浦に設置した PonTsuke と通信を行い、見通しが悪い場所であっても LPWA 通信を確保する方法についても明らかにした。気象観測装置はビワ産地がある長崎半島地域の9か所 (うち3か所は株式会社ベジタリアの FS-2300) を設置し、2020年9月から観測を開始

した (図3)。PonTsuke で観測した気象データの表示は、パソコンやスマートフォンの画面でも見やすい表示とした (図4)。また、出荷予測システムで利用するためには日平均気温を出力することが必要であったことから、CSV 形式をダウンロードができる機能を付加した。データは、CSV 形式で出力され、Excel でそのまま読み込むことができる。また、ブラウザでは任意の日からの積算降水量を確認できる機能も付加することで、防除のタイミングなど栽培管理に活用でき生産現場での利用もできる。

園地台帳には各圃場が所在する60か所の地区が記されているが、予めダウンロードした PonTsuke のデータおよびメッシュ農業気象データを出荷予測システムに利用するため、日平均気温と圃場地区と紐づけ統合する Excel ファイルを作成した (図5)。統合されたデータは、ビワ出荷予測システムに利用できる。



図2 気象観測装置 PonTsuke の通信・観測システム構成



図3 気象観測装置 PonTsuke の設置地点（長崎半島地域）
出典：国土地理院地図（電子国土 WEB）

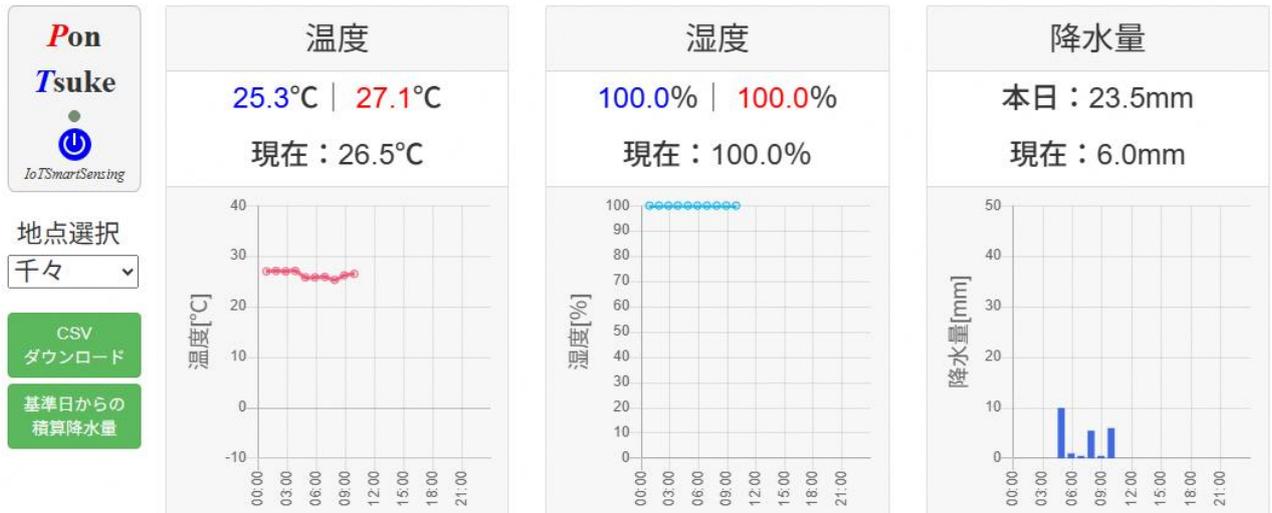


図4 Pontsuke ブラウザ画面の表示例 (気温, 湿度, 降水量)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	IG
1	PonTsuke	メッシュコード	2022/11/1	2022/11/2	2022/11/3	2022/11/4	2022/11/5	2022/11/6	2022/11/7	2022/11/8	2022/11/9	2022/11/10	2022/11/11	2022/11/12	
2	茂木	49290742	16.8838	17.2308	17.1204	15.2592	12.7108	13.7715	14.7454	14.6365	15.0465	17.2412	18.1441	19.0762	
<p>Pontsuke気象データと農研機構メッシュデータを統合してびわ出荷予測システムで利用する気象データを作成します。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;"> <p>1 Pontsukeデータの選択</p> <p>事前にダウンロードしたPontsukeの気象データから日平均気温を算出し行2に表示 ※びわ出荷予測には11/1~7/1のデータが必要です。</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;"> <p>2 日平均気温のコピー</p> <p>日平均気温を行16以降にコピー ※メッシュ気象データと統合する気象データの一覧表を作成します。</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;"> <p>1と2を同時に実施</p> <p>PonTsukeの日平均気温を算出し、行16以降にコピーします。 ※この処理だけでOKです。</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;"> <p>PonTsukeとメッシュを統合</p> <p>びわ出荷予測システムで使用する気象データを作成します。 ※シート"予測用DATA"をコピーして予測システムのシート"気象値"に貼り付けてください。</p> </div> </div>															
15	PonTsuke	メッシュコード	2022/11/1	2022/11/2	2022/11/3	2022/11/4	2022/11/5	2022/11/6	2022/11/7	2022/11/8	2022/11/9	2022/11/10	2022/11/11	2022/11/12	
16	三和	48297677	17.0652	16.5732	18.0808	16.4013	13.7896	13.8636	15.1028	14.9354	14.7848	16.8871	-	-	
17	千々	48297780	17.0622	17.5304	17.8042	16.1208	14.0442	15.3317	15.8667	14.4767	15.1688	17.0329	18.2238	20.0913	
18	大崎	48297791	17.7300	17.6004	18.0458	16.5929	14.1867	14.9392	15.5283	15.2332	15.7358	17.7046	18.7592	19.7183	

図5 Pontsuke と農研機構メッシュ農業気象データを統合するファイル

2) ビワ出荷予測

(1)産地全体の出荷量の推定

着房率、寒害等の減収率、前年の県ビワ結果樹面積から産地全体の出荷量を求める重回帰式を作成した。この予測出荷量と実績値の関係を図 6 に示した。両者には極めて高い正の相関があり全体出荷量の推定に使用できると判断した。

$$\text{予測出荷量} = (\text{着房率} \times 5.39395) + (\text{寒害減収率} \times 4.104999) + (\text{前年の県ビワ結果樹面積} \times 1.2780) - 628.72$$

(2)ビワ出荷予測システム

園地台帳、気象データ、予測マスタ（DVR 計算式、品種別の「茂木」との収穫日の差、樹齢別単収等）から 3 日毎の予測出荷量を出力する Excel アプリケーションを作成した。

本アプリケーションは予測に必要な園地台帳、産地全体の集荷量を予測する重回帰式に DVR 集計、

花房進度から開花終了日を推定する予測式を実装し、収穫日の品種間差、収穫日からの出荷日数、出荷回数、割合などが確認できる。

通常使用する場合には、品種間差や出荷日数・割合を変更する必要はないが、他産地での利用等を考慮しパラメータの変更が可能な仕様とした。出荷予測の流れを図 7 に示した。

2020 年および 2021 年の 4 月に予測した出荷量と出荷実績を図 8 グラフに示した。両年ともに精度よくビワの出荷時期、量を推定できることが実証できた。予測精度は農研機構メッシュ農業気象データのみで予測した 2020 年で RMSE4.47, 決定係数 0.8358 (R^2), 実測値を用いた 2021 年で RMSE3.49, 決定係数 0.9182, 収穫ピーク時は 2020 年, 2021 年ともに予測が 1 日は早かった。RMSE および決定係数は 2021 年の予測精度が高かったが、その差は大きくなかった (表 2)。また、ピーク時の出荷量の差は 2020 年で +1.41 t, 2021 年で +1.72 t であった。

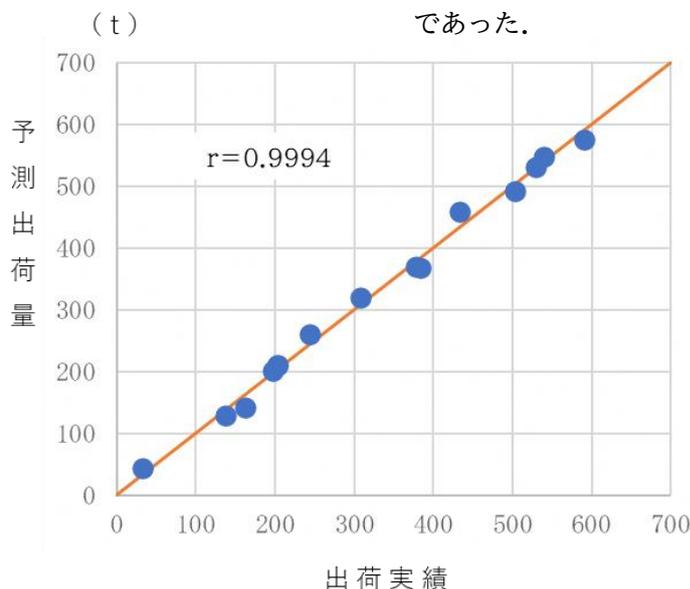


図6 ビワ産地全体の出荷量の推定

表 2 出荷予測システムの予測精度

年次	RMSE	R ²	ピーク日差	ピーク量差
2020	4.47	0.8358	-1日 (予測が1日早い)	+1.41 t (予測がやや多い)
2021	3.49	0.9182	-1日 (予測が1日早い)	+1.72 t (予測がやや多い)

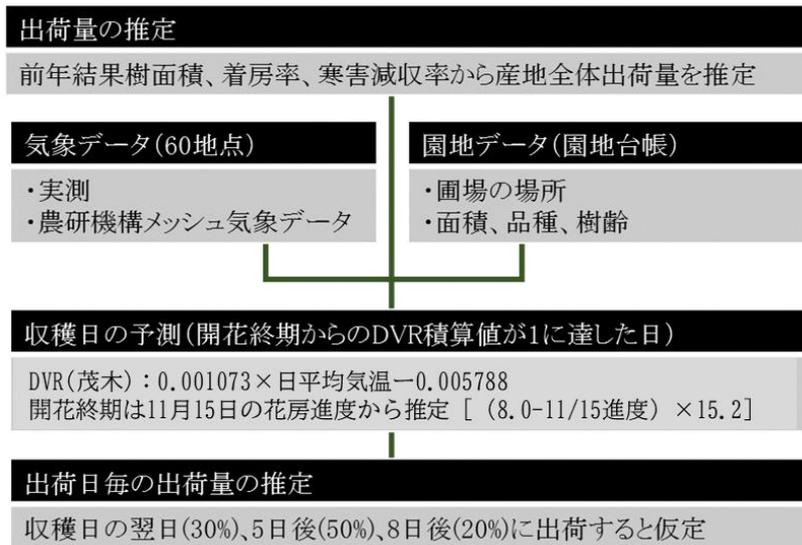


図7 出荷予測システムの構成と推定フロー

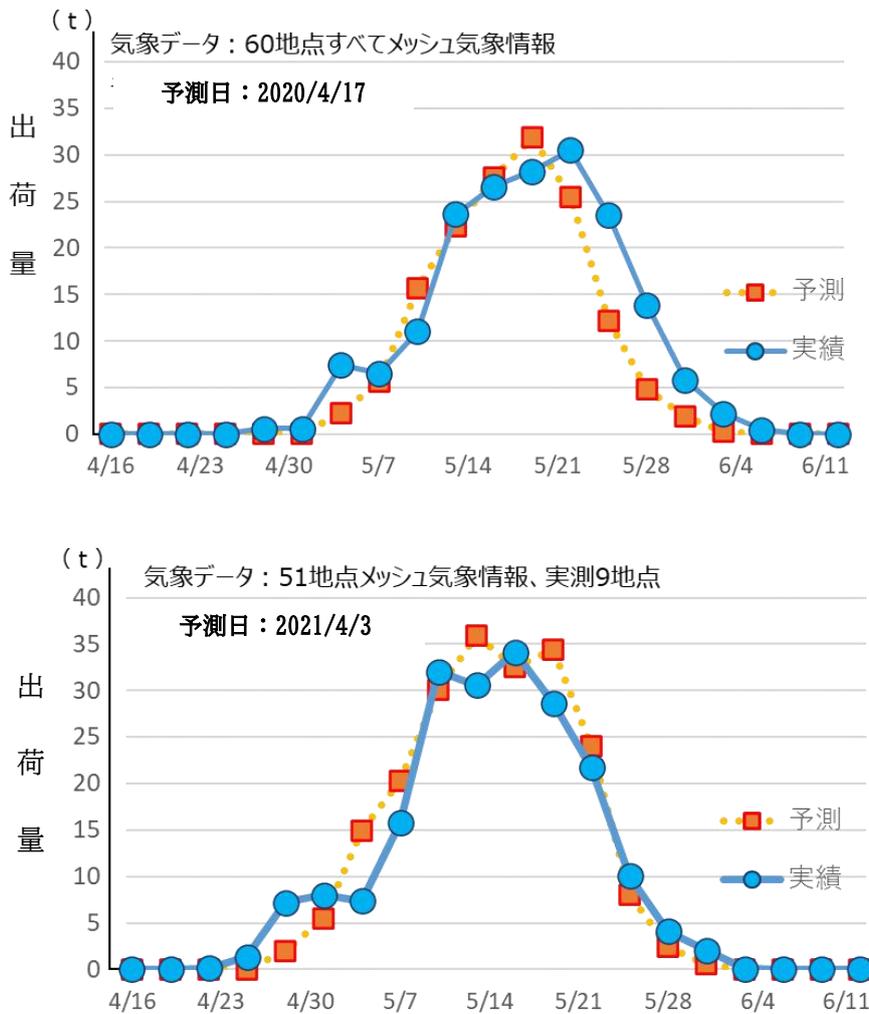


図8 ビワ予測システムによる出荷量の予測と実績 (上: 2020年, 下: 2021年)

4. 考察

本研究では、LPWA 通信技術を活用した気象観測と、園地台帳情報を組み合わせることで、露地ビワの出荷量および出荷時期を予測するシステムの構築を試みた。以下に、本研究の成果と課題、今後の展望について考察する。

1) LPWA 通信技術の有効性と課題

LPWA 通信を用いた気象観測装置 PonTsuke は、商用電源が不要であり、広域に分布する露地ビワ圃場においても安定した気象データの取得を可能にした。特に、携帯回線を使用せずにクラウドへデータ送信できる点は、農業 IoT の普及において大きな利点である。

一方で、観測装置の設置箇所が限られているため、産地全体の気象状況を網羅するには、農研機構のメッシュ農業気象データとの統合が不可欠であった。実測値と推定値の差異は小さいものの、局地的な気象変動や異常気象への対応には、さらなる観測点の増設が必要である。

なお、長崎西彼農業協同組合では、ビワに限らず多くの品目の栽培管理等への気象観測データの利用を進めるため、本研究で開発した気象観測装置 PonTsuke を管内の農協支所 15 か所に設置し、組合員が自由に気象データを確認、利用できる体制を構築した。

2) 出荷予測システムの精度と汎用性

着房率、寒害減収率、結果樹面積を説明変数とした出荷量を推定する重回帰モデルは、過年度の出荷実績と高い相関を示し、出荷量の予測に有効であることが実証された。特に、容易に入手可能なデータを用いて高精度な予測が可能である点は、実用性が高い。

また、DVR を用いた収穫日予測は、品種ごとの収穫期差を考慮することで、産地全体の出荷動態を

3 日単位で把握できるようになり、販売戦略の立案や物流計画に資する市場、販売関係者への情報提供が可能となった。既に本システムはマニュアルとともに技術者に配布され、出荷予測の結果は、全国農業協同組合連合会長崎県本部が発行する雑誌「ながさきの果樹」に掲載され利用されている。

3) 予測精度向上に向けた課題と展望

本研究で構築された Excel ベースの予測システムは、現場での運用を想定した簡易な設計であり、農協の営農指導員や生産者が自ら活用できる点で優れている。しかし、今後の精度向上に向けては、以下の課題への対応が求められる。

予測精度は気象予報値によって左右される。現状の農研機構メッシュ農業気象データは 26 日後までの予報値が提供されるが、より精度の高い長期間の予報値が利用できれば予測精度向上が実現できると考える。

圃場ごとのビワの袋数を把握することで、より精度よく産地の出荷量を推定できる。ドローンにより収集した画像による袋数の推定も今後の検討課題である。

また、AI や機械学習を活用した新たな予測手法による精度向上、スマートフォンアプリとの連携による操作性の向上など、技術的な発展と現場での普及拡大が期待される。

4) 収穫予測の活用と展開

収穫時期については多くの品目で DVR を利用した予測式が開発されているが、その利用は圃場単位に留まっている事例が多い。市場や販売を計画的に行うためには、産地単位の出荷量、時期の情報が必要となる。本システムは既に開発されていた生育予測式をベースに産地単位でビワの出荷量を予測するものであり、ビワの計画販売にとって大きな意味を

持つ。ビワに限らず、これまでの研究成果の中から 価値の高い成果になると考えられる。
産地単位で予測する対応を進めることで、より利用

5. 摘要

本研究では、露地ビワの市場出荷を安定させるため、LPWA 通信を利用した気象観測と園地台帳情報を組み合わせ、産地単位で出荷量と出荷時期を高精度に予測するシステムを開発した。気象観測装置による実測値とメッシュ農業気象データを統合し、着房率、寒害減収率、結果樹面積を説明変数とする重回帰モデルで出荷量を推定し、DVR

と品種補正により収穫日を予測した。Excel ベースのシステムにより、3 日単位で産地全体の出荷動態を算出でき、検証の結果高い精度を示した。本手法は低コストかつ汎用性が高く、他作物や他地域への展開が可能であり、スマート農業と流通効率化に寄与できる。

6. 引用文献

紺野祥平・杉浦俊彦・谷本恵美子・稗圃直史・薦木康徳・山田英尚・岩田浩二. 2020. ビワ果実の成熟日予測モデルの開発. 生物と気象. 20. 41-48

渡邊 修・菊田文太郎・嶋崎 傑・三木敦朗・小林元. 2021. LPWA を活用した西駒ステーションの気温データの遠隔測定. 信州大学農学部 AFC 報告. 19. 71-77

Summary

This study developed a cost-effective forecasting system to stabilize the market shipment of open-field loquat by integrating LPWA-based meteorological monitoring with orchard ledger data. The system combines real-time weather observations and mesh meteorological data, estimates shipment volume using a multiple regression model with fruit set rate, cold damage reduction rate, and bearing tree area as explanatory variables, and predicts harvest dates through DVR (Developmental Rate) accumulation with cultivar adjustments. Implemented in Excel, the system outputs shipment dynamics at three-day intervals. Validation in 2020 and 2021 demonstrated high accuracy. The proposed approach is low-cost, scalable, and applicable to other crops and regions, contributing to smart agriculture and efficient distribution.