

令和3年度 先駆的調査・実証プロジェクト推進事業

余市・仁木スマート農業実証プロジェクト

結果報告書



この事業は公益財団法人北海道市町村振興協会（サマージャンボ宝くじの収益金）の助成を受けて実施しています。

目次

第1章 序章	1
第1節 事業の背景	1
第2節 地域における課題・問題点について	1
第3節 事業の目的	1
第4節 「余市・仁木スマート農業実証プロジェクト調査研究会」の設置	2
第5節 本書の構成	2
第2章 余市・仁木スマート農業実証プロジェクト調査研究の取組概要	3
第1節 実証課題の内容	3
第2節 収穫適期予測・判断材料としての気象データ等の利活用	3
第3節 病害アラーム機能の適用範囲拡大と有効性検証	21
第3章 全体を通じたの考察	24
第1節 研究結果のまとめ	24
第2節 今後の課題と展望	26

第1章 序章

第1節 事業の背景

日本の農業分野では、担い手・労働力不足が深刻化している。主な原因としては少子化などによる人口の減少、就農者の高齢化、コロナ禍による外国人材受入数の減少などがあげられる。令和2年2月時点における全国の農業経営体は約107.6万経営体であり5年前と比較して21.9%減の30.2万経営体減少している。

また、新規就農者及び基幹的農業従事者数(個人経営体)の推移において50歳以上の割合がそれぞれ74%(平成30年)と89.3%(令和2年)と高い割合を占めている。年齢階層別基幹的農業従事者の推移においても令和2年から5年前を比較すると85歳未満のすべての階層で人数が減少しており、就農人口の高齢化・減少の傾向がみられる。このことから、将来において後継者不足により農業の継続が困難になり、後継者不足で技術の継承が途絶えたりすることが予想され対策が必要である。

大規模ワイナリーの参入を皮切りに、ワイン特区の認定を受け、今後、更なるワイナリー増加が見込まれる仁木町と、同じくワイン特区の認定を受け、大小様々な規模のワイナリーが展開されている余市町は連携して、ワインブドウの生産・醸造から販売に至る様々な支援を行っており、この10年間で新規参入による入植者が急増し、ワインブドウの栽培面積が拡大を続けている。

しかし、ワインブドウ栽培に関しては、昨今の気候変動の影響や新規就農者の栽培技術の未熟などにより、病虫害の多発生や収穫遅れによる減収や果実品質の低下などの問題が深刻化している。

道内におけるワインブドウ栽培は本州とは栽培規模が異なり、どちらかという海外の経営サイズに近いが、経営スタイルは日本式のままである。従来から課題であった、農家の経験則や勘による栽培を脱し、栽培管理の体系化・標準化を急ぐ必要がある。

第2節 地域における課題・問題点について

余市町及び仁木町では新規のワイン用ブドウ生産者が近年増加し、ワイン専用品種の栽培面積が増加しているものの、栽培技術が未熟なために病虫害の多発生による減収、収穫遅れ等により品質の低下が散見されている。道内有数のワイン用ブドウ産地である両町においては、ベテラン生産者も存在し、新規就農者への栽培支援なども行われているものの、水稲や畑作物に比べて栽培技術の体系化が十分でなく、農家の経験則や勘による栽培が主流となっているため栽培管理技術に関する生産者間に差が大きく、栽培管理の平準化が遅れている。

第3節 事業の目的

第2節での地域の課題・問題点を解決するため、センシング技術や気象データ等を活用し、

必要なデータを把握、そのデータを基に効果的な病虫害防除や収穫、管理作業が行える栽培管理システムの体系化に資する解析およびモデル構築を行う。

第4節 「余市・仁木スマート農業実証プロジェクト調査研究会」の設置

国が目指しているスマート農業の展開について、生産現場が抱える課題解決に最も効率的な技術を導入し、先端技術を活用した「スマート農業」を実現することにより、農業後継者不足及び労働力確保が困難な生産者への支援を通じた生産性確保及び向上を図ることを目的として、余市町、仁木町、余市町農業協同組合、新おたる農業協同組合、後志総合振興局産業振興部後志改良普及センター、モンガク谷ワイナリー、株式会社自然農園、ピクシーダストテクノロジー株式会社を構成員として、「余市・仁木スマート農業実証プロジェクト調査研究会」を立ち上げた。(令和3年度よりベジタリア株式会社、北海道ワイン後志ヴィンヤード株式会社が加わった。)

・会議の開催状況

令和2年度	第1回	令和2年9月28日	16名出席
	第2回	令和3年2月24日	書面開催
令和3年度	第1回	令和3年6月2日	21名出席（リモート参加含む）
	第2回	令和4年2月24日	書面開催

第5節 本書の構成

第1節「事業の背景」、第2節「地域における課題・問題点について」、第3節「事業の目的」を受け、第2章で本調査研究の取組概要、第3章で全体を通じての考察と今後の展望を記載した。

第2章 余市・仁木スマート農業実証プロジェクト調査研究の取組概要

第1節 実証課題の内容

- ・収穫適期予測・判断材料としての気象データ等の利活用
- ・病害アラーム機能の適用範囲拡大と有効性検証

第2節 収穫適期予測・判断材料としての気象データ等の利活用

2.1 ニーズ調査とデータベース定義

2.1-1 目的

余市町及び仁木町では高齢化、人口減少の進行により、担い手不足や労働力不足が深刻化するなか、先端技術の社会実装によって両町が抱えるこれらの問題の解決に向け価値創造の仕組みを構築することを目指し、波動制御技術、自動運転化ユニット及び人口知能技術など様々な先端技術を持つピクシーダストテクノロジーズ株式会社と包括連携協定を令和元年度に締結したところである。

本協定に係る具体的な事業実施の第一歩として、両町の生産現場が抱える課題解決に向け、同社が有する知見や先端技術を活用した「スマート農業」を実現させ、生産性向上や労働力不足の課題の解決を図ることとし、「自動除草」「自動収穫」実施を計画した。

しかし、事業の実施にあたり、当初予定していた両町の農地でのデータ観測の実施について、東京に所在地のある委託事業者の移動が伴うことから、コロナ禍において、その良否を余市町・仁木町・ピクシーダストテクノロジーズ株式会社の3者により協議・検討を重ね、様々な可能性の検討を行ったが、技術的な問題や行政として農業者の安全を守る観点からやむを得なく実施を中止する判断となった。

このような状況下で、当初の予定通り事業の目的を達成するためには非接触型の調査方法の検討及び現地でのデータ観測を補完できる新たな手法により課題抽出・データ収集を行う必要があり、3者で協議の結果、アンケート調査・最新の文献調査の実施により本事業の目的を達成できるとの判断に至り、データ収集方法の変更を行った。

また、8月から現地（農地）でのデータ観測ができなかったその代替として、仁木町、余市町等で農業リモートセンシング技術の開発を行っている「ベジタリア株式会社」との協力を受け、代替データの収集をしたものである。

2.1-2 調査対象・調査方法

全国のワイン用ぶどう栽培農家・ワイン醸造家

配布数：100件以上（全国のぶどう農家、ワイン醸造家に送付）

回収数：47件

2.1-3 調査結果

令和2年度に実施した、生産者に対するニーズ調査の分析結果では、「病害虫対策」、「収穫量の増加・安定化」、「労働力不足」へのニーズが高かった。令和2年度でピクシーダストテクノロジー株式会社により計画していた「自動除草」や「自動収穫」等の取り組みによる労働力不足への対応が、新型コロナウイルスの影響から実施できなくなったことを踏まえ、令和3年度は植物生理と病害虫対策を中心とした技術・ノウハウを有するベジタリア株式会社による、センシング技術や気象データ等を活用した病害虫防除や栽培管理モデルの最適化モデル構築により収穫ロスを削減し、収穫量の増加と安定化に資する調査・分析にフォーカスすることとした。

3.1 環境計測データを活用した栽培効率化の実証と考察

生産者に対するニーズ調査結果では、「病害虫対策」、「収穫の増加・安定化」のニーズが高かったことから、活用可能性の高いデータとして、「畑ごとの温度」「畑ごとの湿度」「畑ごとの降水量」を選定した。

令和3年度は、病害虫アラームと樹液流センサ計測により栽培管理モデルの最適化モデルを開発するため、仁木町および余市町における気象の特徴を捉えるにあたり、アメダスデータおよびベジタリア社がすでに設置している気象観測装置フィールドサーバのデータをもとに取りまとめた。

3.1-1 環境計測センサの測定地点の確認

気象計測データの計測地点については図1-1 ① 環境計測センサ測定地点に示す。今回は仁木町1か所（東町）・余市町1か所（登町）の計2か所の測定値を使用する。



図 1-1 環境計測センサ設置位置

3.1-2 アメダス気象データ比較と考察

2021年北海道の気象の特徴（北海道札幌管区気象台過去のデータにもとづく）

2021年の気温は、春～夏にかけて、高気圧に覆われ、晴れた日が多かった。8月中旬にオホーツク海高気圧の影響により、一時的にかなりの低温となったが、特に6月から8月上旬にかけては、高気圧に覆われて晴れた日が多く、暖かい空気に覆われて気温がかなり高かった。特に、7月中旬から8月上旬にかけては、太平洋高気圧の張り出しが強く、7月は1946年の統計開始以降、月平均気温の平年差と比較して+2.8℃となり、第1位の高温となった。さらには15日間連続（7月24日～8月7日）の猛暑日、真夏日は27日間連続（7月13日～8月8日）を記録し、多くの地点で観測史上及び7月や8月としての日最高気温の高い方からの極値を連日更新した。全般的に生育期間中の気温は平年比より1度高く、平年より高温だったと考えられる。

降雨量は、春に断続的に低気圧が発生し、雨が多かった。特に5月には前年比の120%の降雨を記録した。6月～9月は高気圧に覆われて晴れた日が多く、日本海側を中心に少なかった。特に、6月～7月は記録的な少雨となり、6月～8月の期間中の降雨量は、平年比の65%となった一方、10月は低気圧の影響を受け、平年比の136%という多雨となった。生育期間中の降雨量は平年比の87.6%で、記録的な少雨の年であった。

日照時間は、高気圧に覆われて全般的に晴れが多く、特に成熟期に向かう6月～8月には平年比136%、9月は平年比の124%の日照を記録し、成熟期に記録的な多照となった。一方で5月と10月は低気圧の影響で雨が多く、生育期間中の日照時間は平年比が101%となり、日照が多い時期と少ない時期が極端な年であった。

3.1-3 各種データ比較と考察

今年度は仁木町・余市町に設置した環境観測センサ2地点について、2020年から2021年のデータについてとりまとめた。計測した2地点は2キロ圏内、標高40mから96mの間に分布しており（表1）、56mの標高差が認められる。

表1 地点別標高情報

計測地点名	標高 (m)	気象計
余市町登町	40	フィールドサーバ
仁木町東町	96	フィールドサーバ

積算気温と累積降水量は、植物の生育段階と高い相関関係にある。積算気温は植物生体内での各代謝に関わる酵素反応を律速し、累積降水量は植物体の吸水量や枝の伸びと関係があると考えられている。以下、積算気温、累積降水量、日射量にわけて考察する。

3.1-3-1 平均気温

日平均気温推移は、地点間で同様の推移を示していた。各地点における年次積算気温の推移は仁木町・余市町とも 2021 年が高く推移している。特に 7 月下旬～8 月中旬にかけて高温が続いたことにより、前年と比較して 100℃以上高く推移し、暑い夏であったことを示している。また、仁木町・余市町の地点間における積算温度では 2020 年・2021 年とも仁木町のほうが 100℃程高い傾向にあり、2021 年においては最大 130℃程度まで差が開いた。(図 1～4)

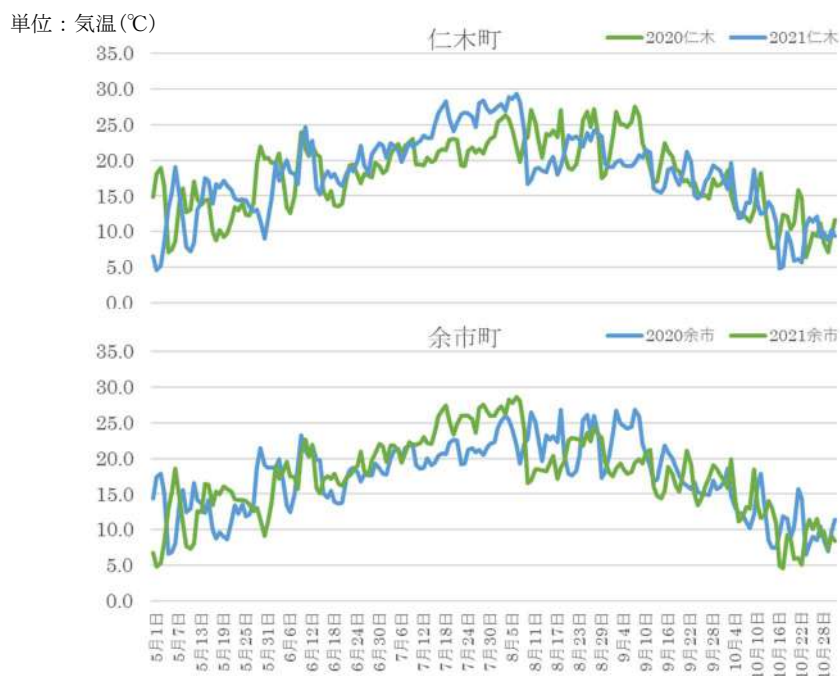


図 1 2020 年～2021 年の地点別気温推移(各年 5 月 1 日～11 月 1 日)



図2 2020年～2021年の年次気温推移（各年5月1日～11月1日）

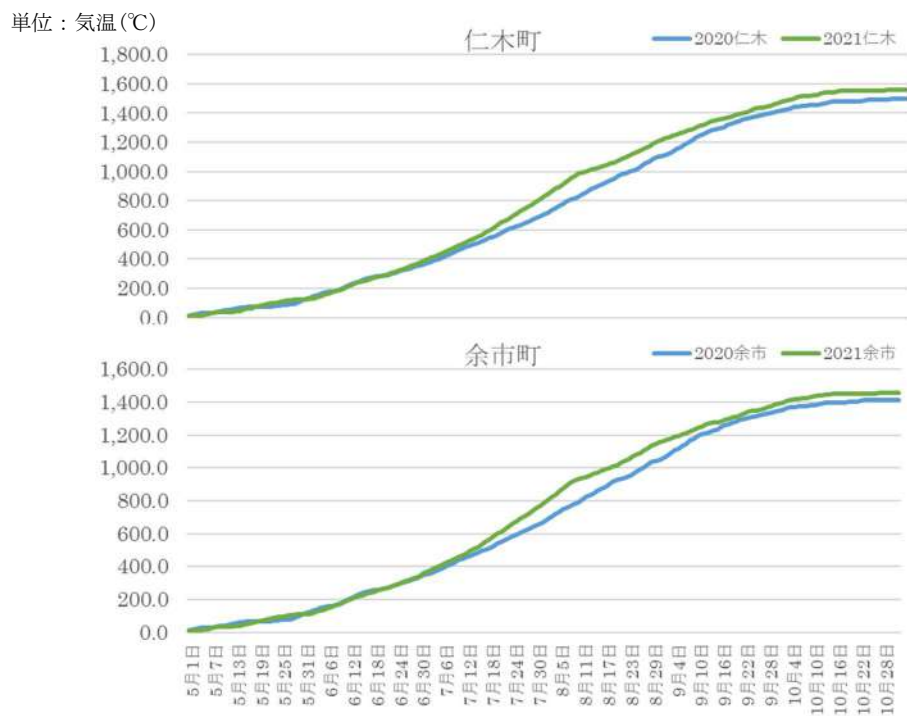


図3 2020年～2021年の地区別有効積算温度推移（各年5月1日～11月1日）

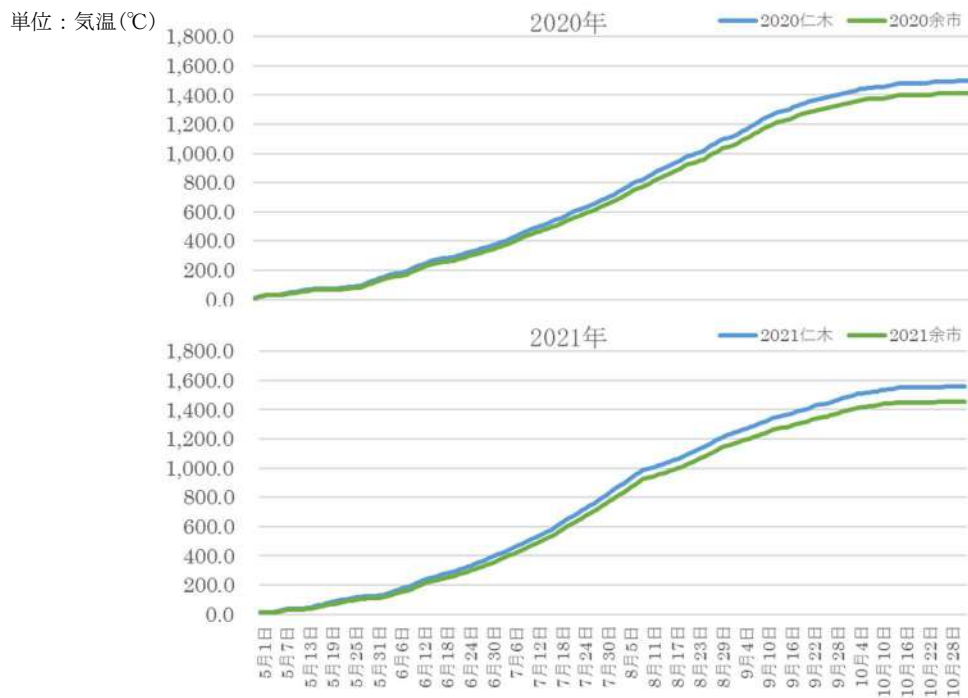


図4 2020年～2021年の年次有効積算温度推移（各年5月1日～11月1日）

3.1-3-2 平均降水量

降水量に関しては余市観測所のデータによると 2020年に比べ、2021年は1回の降雨あたりの降水量が多い傾向にある。生育期である6月から8月にかけては少雨だったが、成熟期後半に雨が続いて多雨となり、累積降水量も2021年が高くなった。特に10月20日・21日の2日間で10月降水量の平年値であるとほぼ同等の降雨を観測し、非常に雨の多い月となった。

(図5～6)

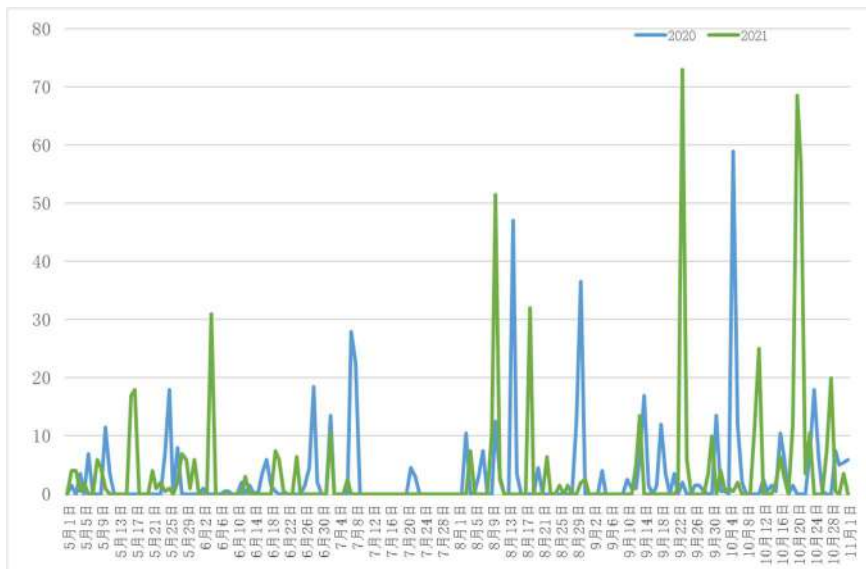


図5 2020年～2021年の年次降水量推移（各年5月1日～11月1日）

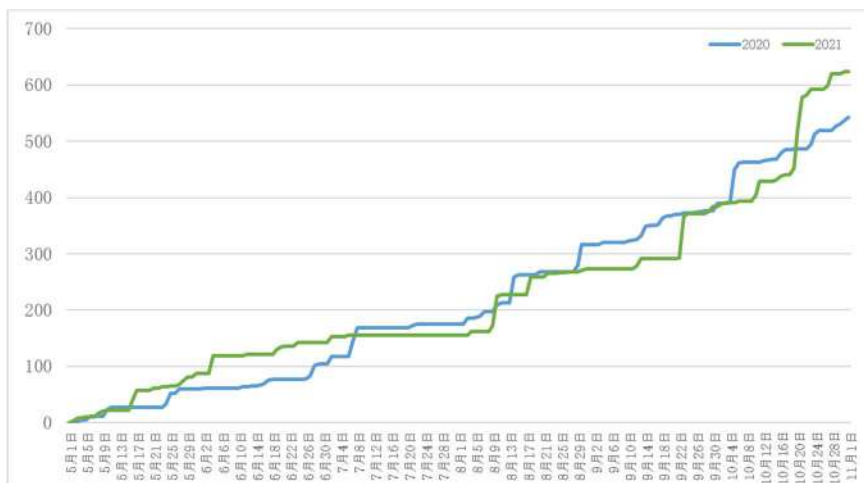


図6 2020年～2021年の年次累積降水量推移（各年5月1日～11月1日）

3.1-3-3 平均日射量

日射量の地点別推移は、2020年・2021年とも仁木町がかなり低い傾向にある。余市町では成熟期を迎える6月～8月に多照となり高い値で推移した。また累積日射量推移は2地点ともに年変動の差異が見られ、2地点とも2021年の7月以降の日射量が2020年に比較して高い傾向にあり、特に仁木町は1000W/m²程度高くなった。（図7～9）

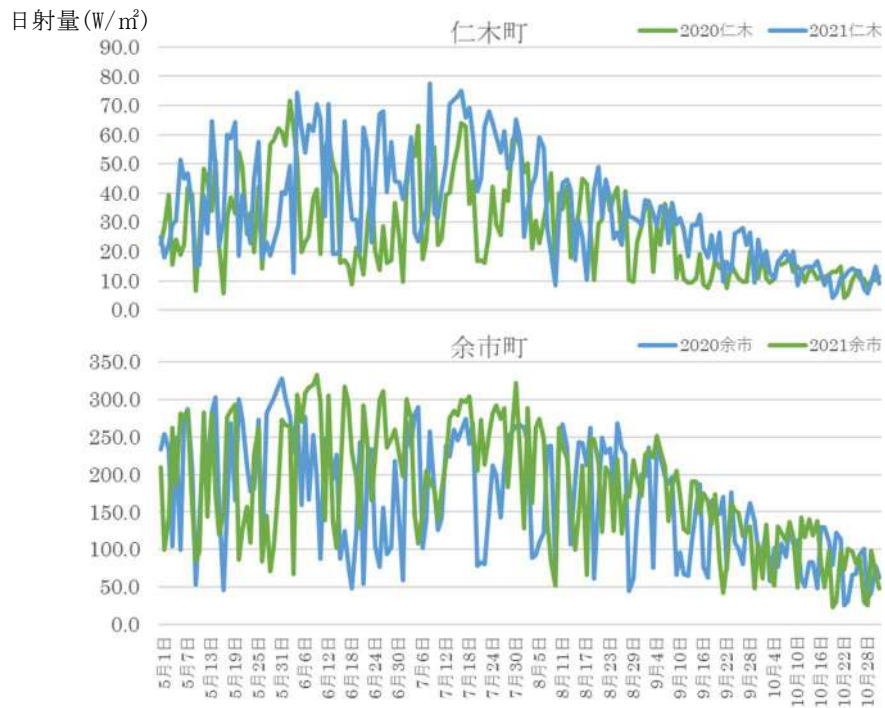


図7 2020年～2021年の地区別日射量推移（各年5月1日～11月1日）

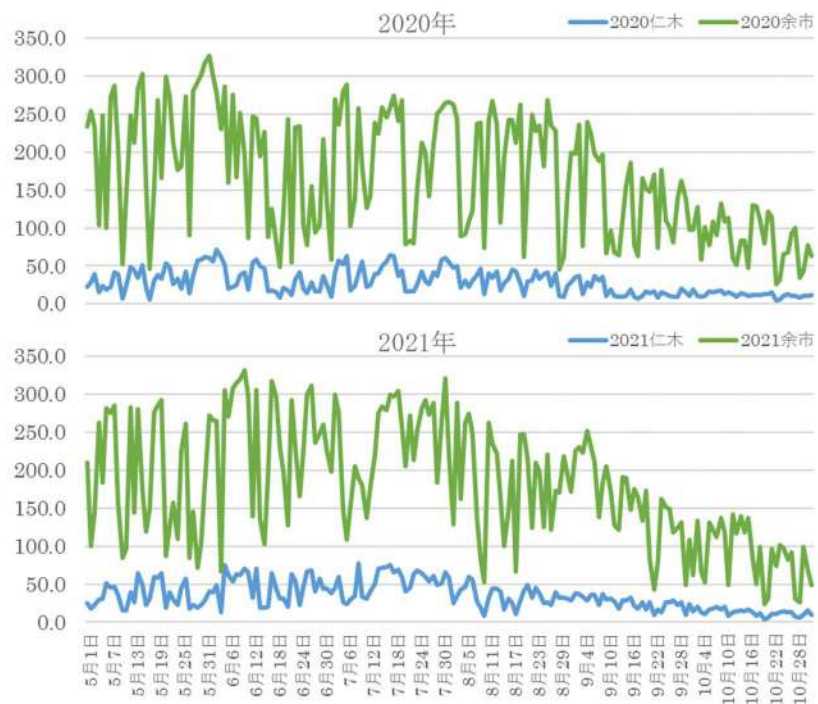


図8 2020年～2021年の年次日射量推移（各年5月1日～11月1日）

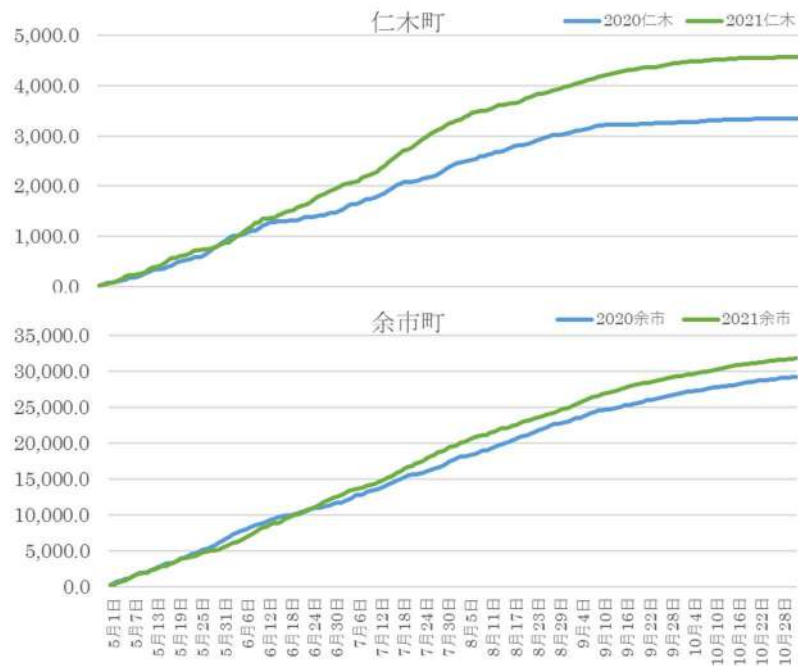


図9 2020年～2021年の地区別累積日射量推移（各年5月1日～11月1日）

これら環境計測センサより取得した気象データは、環境変化による生育状況の変化予兆をいち早く把握することができる。特に収穫適期を判断する上で重要なファクターとなる有効積算温度を、栽培地により近い環境で把握ができるようになり、より高精度な収穫適期予測が可能となる。さらに日射量や降水量は、後述する樹木内の水分生理を把握する樹液流計測と併用することで、成長期における植物の光合成量をよりの確に把握できるようになり、誘引等、栽培における重要作業判断の一助となりうる。

次項では、実際に環境計測センサにて得られた気象データを用い、樹液流センサにて得られたデータから考察し、仁木町・余市町におけるワイナードの生理モデルを考察する。

3.2 樹液流計測による植物生理モデルの構築

気象観測装置から得られる気象データをもとにワインブドウの生理状態、ひいては収穫適期等をよりの確に予測可能にするためには植物生理モデルの構築が必要となる。そのためには実際の栽培環境において、ワインブドウがどのような生理反応を示しているのか解析する必要がある。そこで、生育期におけるワインブドウ '*Pinot noir*' の水分生理特性について詳細に調査した。

3.2-1 材料および方法

2021年7月16日から9月21日にかけて、余市町に位置するフィールドサーバが設置済みの圃場（自然農園グループ「ドメヌ・イチ」のワインブドウ圃場（43° 09' 40.4"N 140° 47' 56.5"E）にて計測を行った。

環境情報として温湿度、日射量、雨量、風向風速、土壌水分、葉面濡れ値がクラウド上にアップされ、データは専用 iPhone アプリ「Field Watch2」からダウンロードした。また、Kisvin Science 社製樹液流センサ 10 本を、日本環境計測社製データロガー（MIJ-01）に組み込み、樹液流計測装置として栽培圃場の斜面上部と下部に 2 式設置した。それぞれ 10 株の樹冠新梢ないし 2 年枝の樹液流量を計測した。茎熱収支式樹液流センサは露地計測において雨水の侵入による熱ノイズが発生しやすいため、設置部位を吸湿性の高い PV クロスで多い、センサ設置部位への雨水の侵入を防ぐ処理を施した。両計測装置はバッテリー駆動とし、断続的に 3 回に分けて生育ステージごとに 10 分間隔のセンサ信号をデータロガー上の SD カードに保存した。得られたセンサ信号は、回収後に専用ソフトウェア上で樹液流量に換算し、環境データと併せて解析に供試した。

3.2-2 結果と考察

フィールドサーバで計測された環境データは安定してロスなくデータを取得できていた（図 1）。温湿度データよりブドウの蒸散のドライビングフォースとなる大気飽差を算出し、Humidity deficit[gm^{-3}]として扱った。計測期間中 5 月、9 月、10 月に相対湿度が 0 を記録する期間が見られたが、これは電氣的なエラーであると見受けられる。温湿度はおよそ 15~35°C および 40~100%RH の範囲で推移し、大気飽差は 0~6 gm^{-3} で推移していた。大気飽差は 7 月でも月平均で 1.94 gm^{-3} であり、同月の山梨県甲府市が平年で 2.60 gm^{-3} であることと比較すると、約 25%ほど蒸散負荷が低いものと考えられる。また、雨天日や曇天日が少ない分、光合成に必要な太陽光エネルギーを十分に得られているものと思われる。

このような環境条件下において、調査地の圃場では斜面上部と下部に多少の生育差が見て取れる。水はけがよい斜面上部ではわずかに樹の生育が悪く、斜面下部では樹の生育がよい一方で、どぶヅルと負け枝の混在が目立つ。樹の生育および枝の勝ち負けは水分生理状態によ

るところが大きい。蒸散量が盛んな7月中旬の新梢樹液流量（≒蒸散量）を斜面上部と下部で比較したところ、斜面下部に植わったブドウ樹に対して、斜面上部に植わったブドウ樹の蒸散量が午前5%前後、午後は10~15%ほど低下していた。（図2）本来気孔を閉じにくい特徴を持つ‘Pinot noir’であるが、午後の樹液流量の低下より、斜面上部では水分ストレスがかかっていることが示唆された。

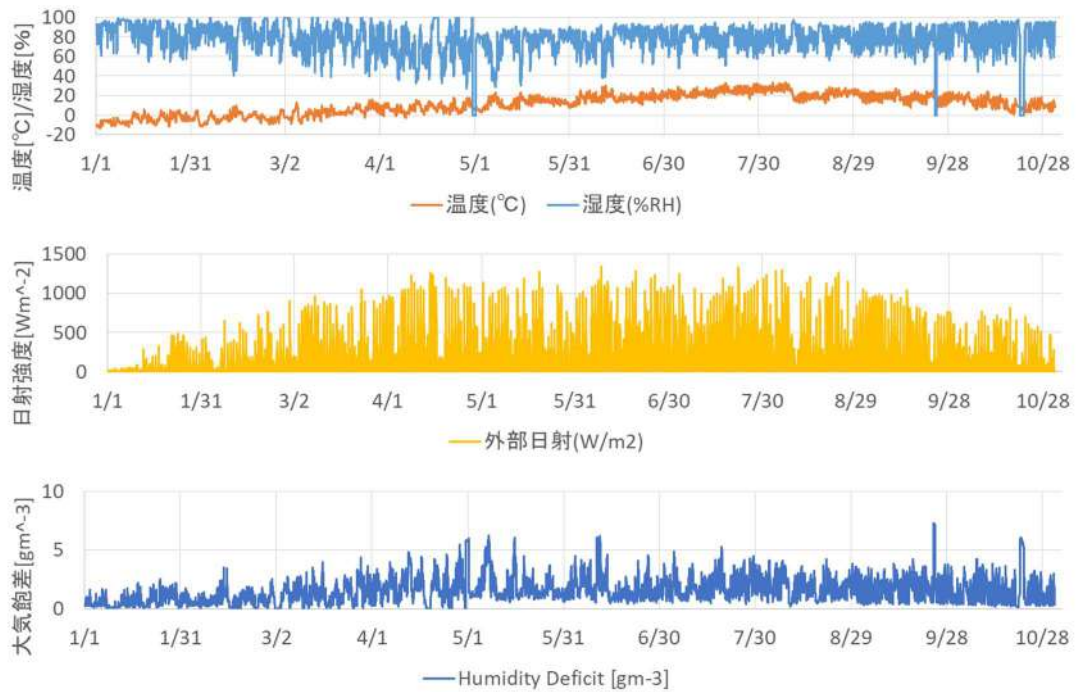


図1. 2021年1月1日から10月31日までの気象データ

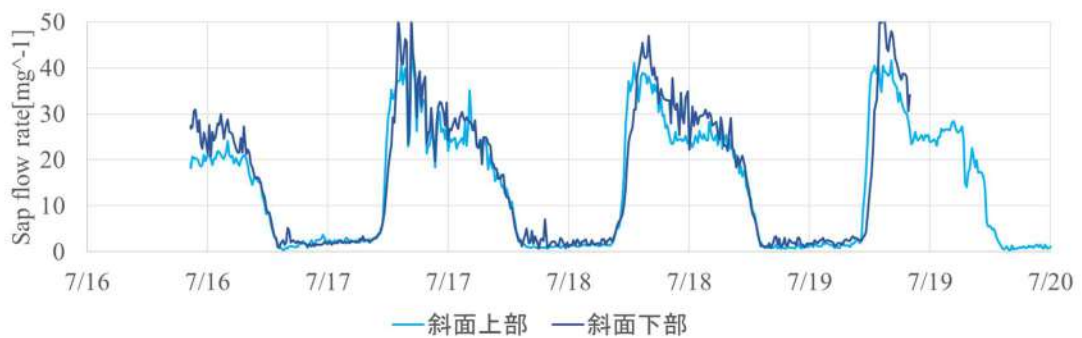


図2. 斜面上部および斜面下部における樹液流量の比較
各線は10本の枝における計測値の平均値を示す。

1) 水分生理モデルの構築

次に、得られた環境データおよび樹液流量データより、樹冠光合成量を推定するためのモデル構築を行った。植物が光合成を行うにあたり、材料となる二酸化炭素ガスは葉裏の気孔から吸収される。この気孔の開度に相当するガスコンダクタンスと呼ばれる指標を、蒸散量に等しいと仮定される樹液流量を大気飽差（HD: humidity deficit）で除すことにより得られる。このガスコンダクタンスと日射強度（Rad: Radiation）の関係を調査したところ、図3のように午前と午後でヒステリシスを持ったループを持った無相関関係が得られた。午前と午後を分離して考察すると、午前中は機械的に気孔が開閉している様に捉えられ、午後はガスコンダクタンスと日射強度の間に非線形関係が認められた。つまり、午後はブドウの葉が積極的に環境に適応しており、気孔開度を能動的に制御していることを示している。

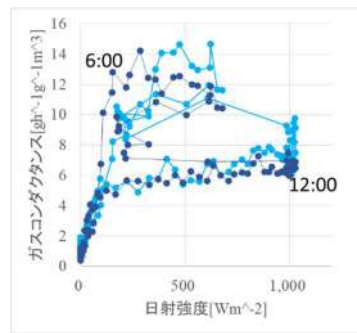


図3. ブドウ樹冠枝のガスコンダクタンスと日射強度の関係

データは7月18日の日中のデータ。

この午後の気孔開閉を抜き出して調査したところ、以下のことが明らかになった。図3においてガスコンダクタンスと日射強度の関係が非直角双曲線を描いていたため、本調査で得られたデータセット（斜面上部）をもとに、まずガスコンダクタンスの逆数である拡散抵抗値を求めた。拡散抵抗値は大気飽差との間でバラツキの大きな非線形関係を持っている。過去に他の作物で作成した蒸散モデルを参考に、拡散抵抗値と大気飽差の関係を日射強度のレベルごとに分離してみた（図4、表1）。その結果、拡散抵抗値と日射強度の一回帰式の傾き（ α ）と日射強度の間に非線形関係が認められ、午前と午後で関係式に違いが認められた。（図5）

以上より、ブドウ樹冠葉の拡散抵抗値は以下の式により推定可能となり、推定によって得られた拡散抵抗値を逆算推定拡散抵抗値とした。

$$\text{(午前の推定式)} \quad \text{逆算推定拡散抵抗値} = (0.9852 \times \exp(-0.504 \times \ln \text{Rad})) \times \text{HD}$$

$$\text{(午後の推定式)} \quad \text{逆算推定拡散抵抗値} = (1.198 \times \exp(-0.418 \times \ln \text{Rad})) \times \text{HD}$$

このモデル式に環境計測値を代入することで得られる逆算推定拡散抵抗値は逆数をとることで推定ガスコンダクタンス値となり、気象データから中長期的にブドウ樹のガスコンダクタンスを算出可能となる。ガスコンダクタンスは光合成速度との間に正の相関関係があることが広

く知られており、‘Pinot noir’については以下の式を用いて光合成速度に変換可能となる。前述の通り、斜面下部においてはブドウ樹が利用可能な土壌水分の影響で午前と午後の反応が斜面上部のブドウ樹と異なるが、微気象環境に対する樹液流動パターンには差が見られないことから、モデル式の基本構造には差がないが量的な差異は係数を乗じることで対応可能である。

作成したモデルがどの程度ブドウ樹の環境に対する水揚げ反応を表現しきれているのかを評価した。

以後、ここで作成した拡散抵抗値の推定モデル式を評価しつつ、最終的に環境データのみから光合成量の推定を行い、収穫最適日の推定方法を検討する。図 6 に示したように、特に午前中の高い樹液流量と日変動パターンを正確に捉えられてはいないが、朝方の樹液流の立ち上がり時刻や夜半の樹液流が止まる時刻、おおよその日積算樹液流量は一致しており、推定樹液流量と実樹液流量の間に比較的高い 1 次の相関関係が得られた (図 7)。この樹液流量の推定モデル式は、式の構造を見直すことで精度を向上できる余地が十分残っている。

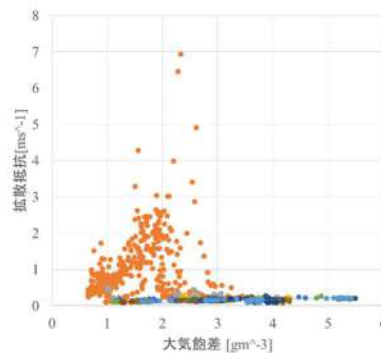


図 4. 午後の大気飽差と拡散抵抗値の関係

表 1. 日射強度別の拡散抵抗値と大気飽差の 1 次回帰係数

日射強度レンジ	傾き	決定係数
0-100	0.6105	0.0131
100-200	0.0904	-1.235
200-300	0.0691	-1.553
300-400	0.0636	-1.113
400-500	0.056	-0.02
500-600	0.0529	0.3773
600-700	0.0462	-0.186
700-800	0.0459	-0.338
800-900	0.0418	-0.604
900-1000	0.0416	-0.337
1000<	0.0426	0.2172

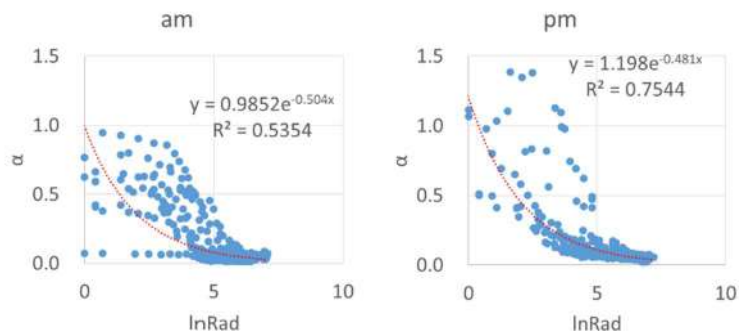


図 5. 拡散抵抗値と日射強度の一回帰式の傾き (α) と自然対数をとった日射強度の関係

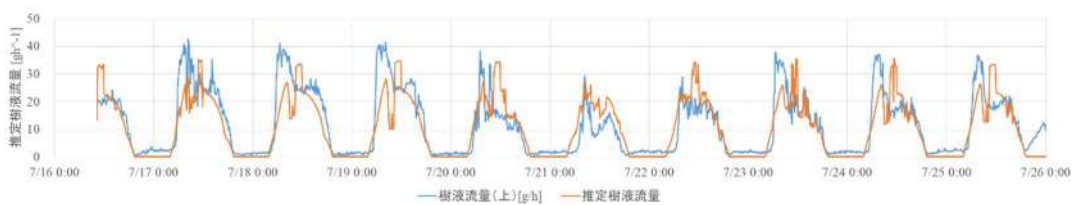


図 6. 樹液流量の実測値と推定値の比較

斜面上部における 7/16 から 7/26 までのデータセットを使用

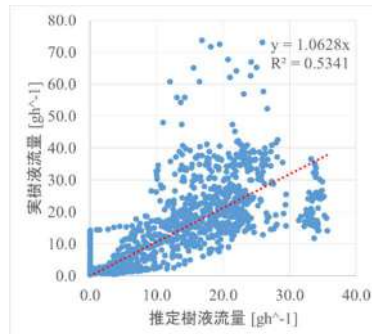


図 7. 実樹液流量と推定樹液流量の相関図

2) 生育ステージの予測

ブドウ樹に適用されるフェノロジーのモデルは、ワイン生産者やワインメーカーに関連する作業スケジュールの決定を支援する貴重なツールである。ブドウの発育における 3 つの主要な表現段階、すなわち、萌芽日、開花日、ヴェレーゾン開始日、収穫日を推定するために一般的に GDD(Growing Degree Day)が利用される。しかし、この GDD を用いた各生育ステージの推定は、温度に対する各生育ステージの生理反応が一律であるとするもので、実際は各生育ステージにおける温度作用は異なる。そこで、今回はブドウの 4 つの主要な表現期（芽吹き、開花、ヴェレーゾン、収穫）をシミュレートするために SM モデルを適用した。SM 関数(1)は生育ステー

ジゴとの温度応答性を表現するために2つの変数を含んでおり、 e 変数はモデル曲線の2軸方向の配置に関係し、 d 変数は曲線の歪度を決定する。

$$SM = 1 / (1 + \exp[d(Td - e)]) \quad (1)$$

ここで、 Td は日平均気温を意味する。圃場で計測した気象データを使用して各フェノロジー・ステージを推定するための3つの一般化シグモイドモデル (GSM) を構築した (萌芽: $d = -0.6$, $e = 8.6$; 開花: $d = -0.6$, $e = 13.7$; ベレーゾン/収穫: $d = -0.5$, $e = 13.2$ 、図8)。

この関数の発生日から表現段階推定日までの積分値を F とし、これが表現段階を完了するのに必要な熱量に相当する。萌芽日までに必要な F の起算日は1月1日とし、開花日とヴェレーゾン開始日、収穫日のための起算日はその前の表現開始日、すなわち、それぞれ萌芽日と開花日、ベレーゾン開始日とした。GSM に使用するセントロイド変数は、約90%の品種において高い性能を示し、品種固有の変数の代わりに使用することもできる。

このモデルは、海外のワイン産地で51品種のブドウのフェノロジーデータを用いて校正・検証されたものをベースとしている。他産地での検証結果では、全体としてRMSE (平均二乗誤差) は7日未満、EF (有効係数) は0.5以上であった。しかし、台木品種が異なれば当然春先の温度感受性も異なれば吸水特性も異なる。さらに言えば地形効果による土壤水分条件の差異も影響するため、過去の各表現開始日の記録と気象データを数年分解析し、畑ごとにユニークな変数を求めることが望ましい。今回はドメヌ・イチの試験圃場において2021年に観測されたデータのみを用いてモデル式を仮構築したが、より汎用性の高いモデル式を構築するために今後データセットの集積が必要である。

今回他地点における2021年のデータセットより‘Pinot noir’の F を仮に萌芽24.87、開花33.84、ベレーゾン52.67、収穫92.07とし、ドメヌ・イチ‘Pinot noir’圃場の各表現日を推定してみたところ、開花日のみ実際とズレが認められた。今後過去数年分のデータセットをもとに、より精密に各モデル変数を求めていく。また、今後実装予定のWEBアプリケーションでは過去の平均的な F 値と現在値の差分を明示し、各表現日までの日数を予測しやすくする。

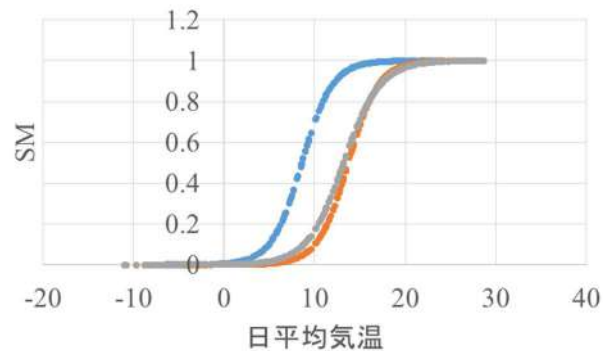


図8. 日平均気温と SM 値のシグモイド関係

青いプロットが萌芽、橙色のプロットが開花、灰色のプロットがベレーゾン/収穫を示す

続いて、各生育ステージにおける葉の光合成能力を考慮した、全生育期間にわたる光合成量の推定を行う。Bertamini ら (2003) を参考に、‘Pinot noir’ の葉齢ステージごとの最大光合成量を推定する (表 2、[1])。まず、図 9. に最大光合成速度と萌芽後日数の関係を示した。萌芽後日数を変数として最大光合成速度をワイブル関数で表現した (図 9)。今回は個体あたりの光合成量を推定するため、毎日の個体あたりの総葉面積が必要となるが、定期的な計測は容易ではない。そこで、次に仮の葉面積推定モデル式を構築することとした。

個体あたりの総葉面積は、日平均気温当たりの葉面積展開速度を $21.5\text{cm}^2/\text{C}$ として算出した落葉等の葉面積の脱落を考慮しない葉面積モデル式に、ワイブル分布を乗じた上でさらに実際の摘芯日に摘芯強度に応じた葉面積を減じることで推定した (図 10)。

ただし、葉面積推定モデルについては本調査内で実施できなかったため、過去に余市町内の別圃場において作成したモデル式を用いた。したがって、ドメヌ・イチの圃場における葉面積の展開速度とはズレがあるものと思われる。実際にこのモデルを運用する際は、ある程度の真値とのズレは許容した上で、得られる推定値を用いることになる。摘芯時に減少した葉面積をある程度実測する必要があり、定期的な実際の総葉面積の実測も含めて、より煩雑さを排除した葉面積の推定方法を検討する必要があると考える。

生育期間中の光合成速度を萌芽日 (5 月 15 日) から 10 月 31 日まで積算した (図 11)。この生育期間中の累積光合成量の増加速度、特に開花日以降の累積光合成量は果粒への同化産物の転流量とある程度比例しているものと考えられる。

表 2. Bertamini ら (2003) による生育ステージごとの最大光合成速度

	展葉期	展葉完了後	成熟期	成熟後期	老齢期
最大光合成速度 [mmolm ⁻² s ⁻¹]	2.4 ± 0.1	7.2 ± 0.3	11.8 ± 0.5	5.1 ± 0.2	2.7 ± 0.1

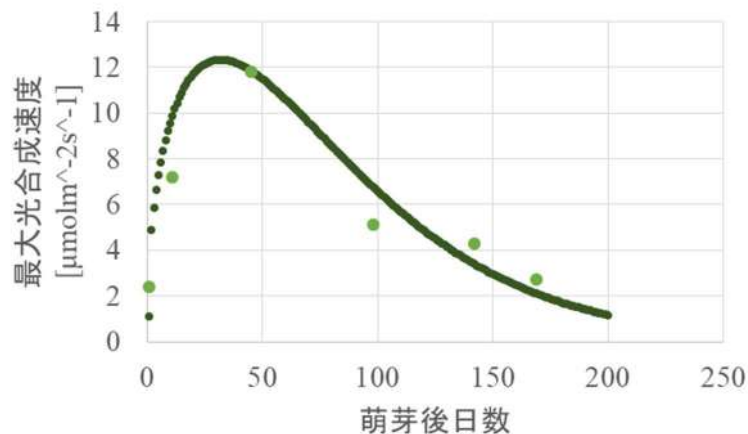


図 9. 最大光合成速度と萌芽後日数の関係

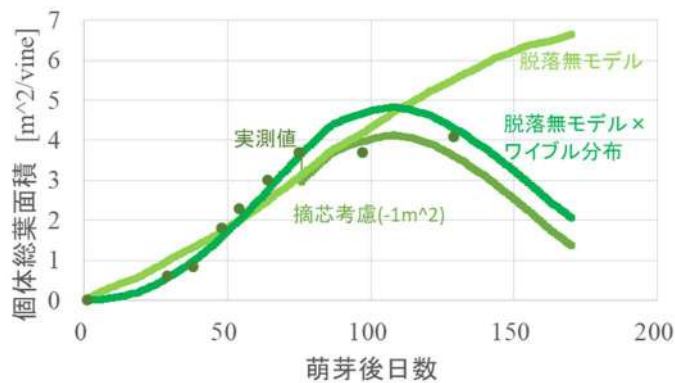


図 10. 個体総葉面積の経日変化

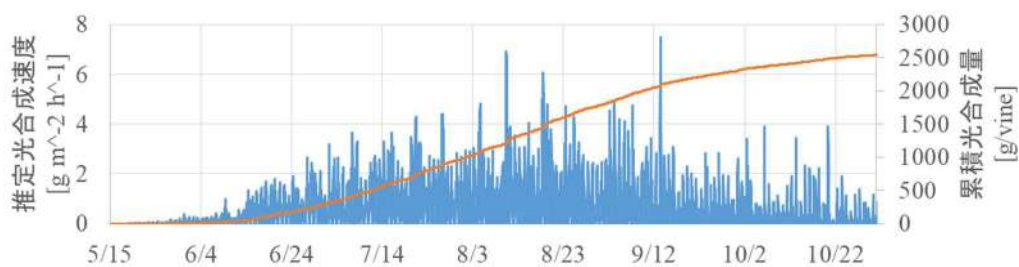


図 11. 個体あたりの推定光合成速度と累積光合成量の経日変化

3) 収穫最適日の検討

収穫最適日を決めるために、実際の果実の成熟具合を非破壊方式の携帯型 FT-IR で追跡調査する方法を考えた。しかし、2021 年度はコロナ禍の中、電子パーツの世界的な枯渇によって予定していた携帯型 FT-IR が納品不可となり、使用できなかった。そこで、気象データベース

で開花日以降の果粒への同化産物転流量を予測することにより収穫最適日を決定する方法に切り替えた。特に開花日以降の累積光合成量は果粒への同化産物の転流量とある程度比例しているものと考えられる。本調査においては、開花日以後の累積光合成量が 2077.74g で収穫を迎えるという結果になった。しかし、この結果は **Brix** のみを指標としており、実際のワインメーカーが判断指標としている糖酸比を現時点では考慮できていない。酸の消失は温度履歴と関係することが広く知られているが、定量的なモデル化にはまだ検討の余地が残されている。今後の課題として、モデル機能の拡張に取り組むものとする。

第3節 病害アラーム機能の適用範囲拡大と有効性検証

ワインブドウ栽培において防除は収量および果実品質を維持するために重要な管理作業である。しかし、どのような環境条件の時に農薬散布をすべきか、感覚的に判断されており、散布タイミングの判断基準に一貫性がないことが病気を抑えられない要因の一つとなっている。特に新規就農者は経験不足から防除タイミングを逃しやすい。そこで、病原菌は特定の環境条件がそろって感染しやすくなるため、気象データを用いて各病原菌の感染条件をアラーム発出する機能を実装する。病害アラーム機能の適用病害を拡張すべく、アラームのアルゴリズムを再構築、検討した。

<灰カビ病>

灰カビ病は生育期間中いつでも発生する可能性があるが、収穫時期に最も多く見られる。灰カビ病は通常、熟した果実に感染する。この病気は、果実の外郭（葉、芽、花房）、収穫物、そして主に果房に現れる。最も重要な症状は以下の通り。

- 葉では火傷のような広範囲の壊死が葉の縁に現れ、湿った状態では灰色の塵のような形になる。葉への被害は通常、経済的に重要ではない。
- スプラウトや新芽にも発生。初期症状は、細長い茶色の斑点として現れ、湿度が高い場合は灰色の毛羽で覆われる。植物の末節では、白っぽい背景に細長い黒っぽい斑点が枝に沿って現れ、主に末端部では悪臭を放ち、粘り気も少ない。この感染・発症により、いくつかの若い芽が失われ、それに伴って収穫量が減少したり、後には芽の根元にあるいくつかの芽が影響を受け、翌年には芽が出なくなったりする。
- ブドウでは 開花期と結実期に症状が現れ、果房が暗褐色を呈す。感染すると、腐ったような外観になり、表面に特徴的な灰色のカビが発生する。また、将来のワインの品質を低下させる原因となる。

図 12 は、灰カビモデルに沿ったワークフローを示している。温度 (Tm) と湿度 (Hm) は、ボトリティス菌の発生に影響を与える 2 つの重要な要因である。感染段階では、温度 20~25℃、相対湿度 90%で最大 15 時間を必要とする[2]。

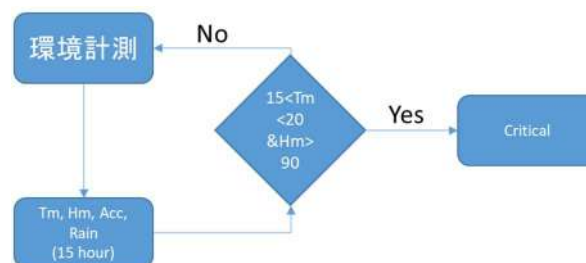


図 12. 灰カビ病の発病アルゴリズム

<べと病>

べと病アラーム（図 13）については、これまでベジタリア社において Facebook メッセージおよびメールでのアラーム発出機能を長野県内において実装、運用してきた。感染条件の計算には温湿度に加え葉濡れ時間が必要であり、葉面濡れセンサの導入が必要となる。しかし、運用上葉濡れセンサが導入できないことも考えられるため、葉濡れ時間を必要としないアルゴリズムも検討した（図 14）。

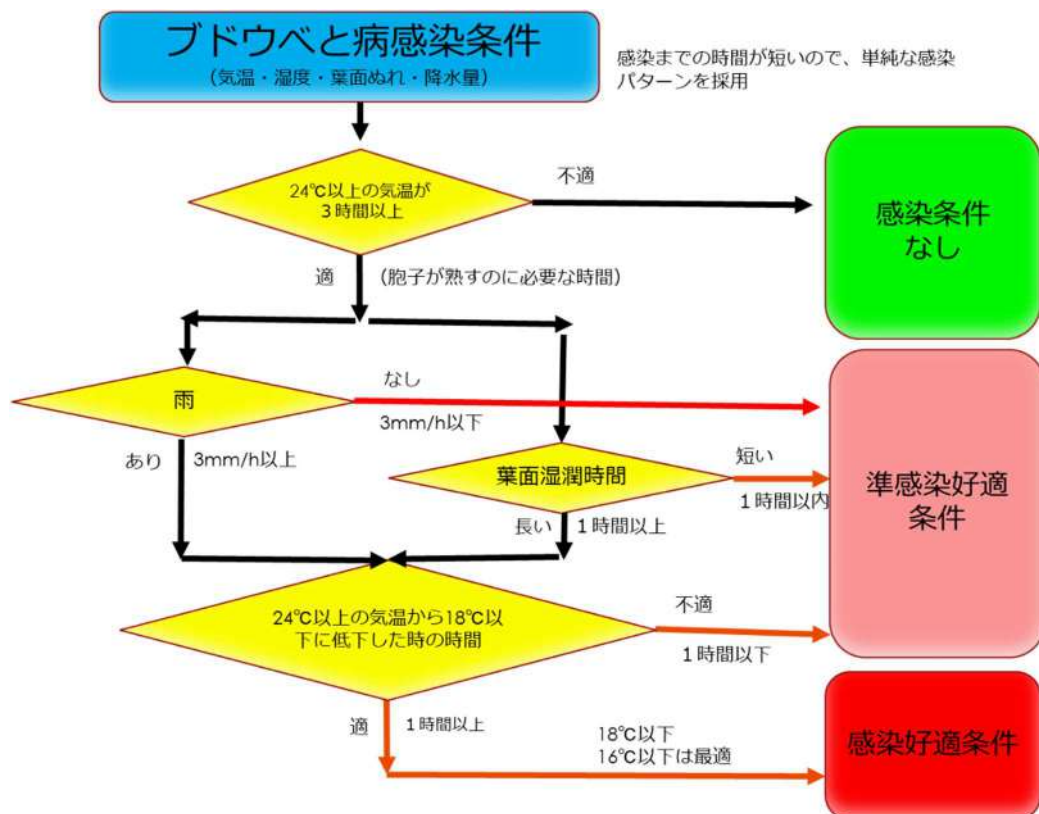


図 13. べと病の感染条件アルゴリズム

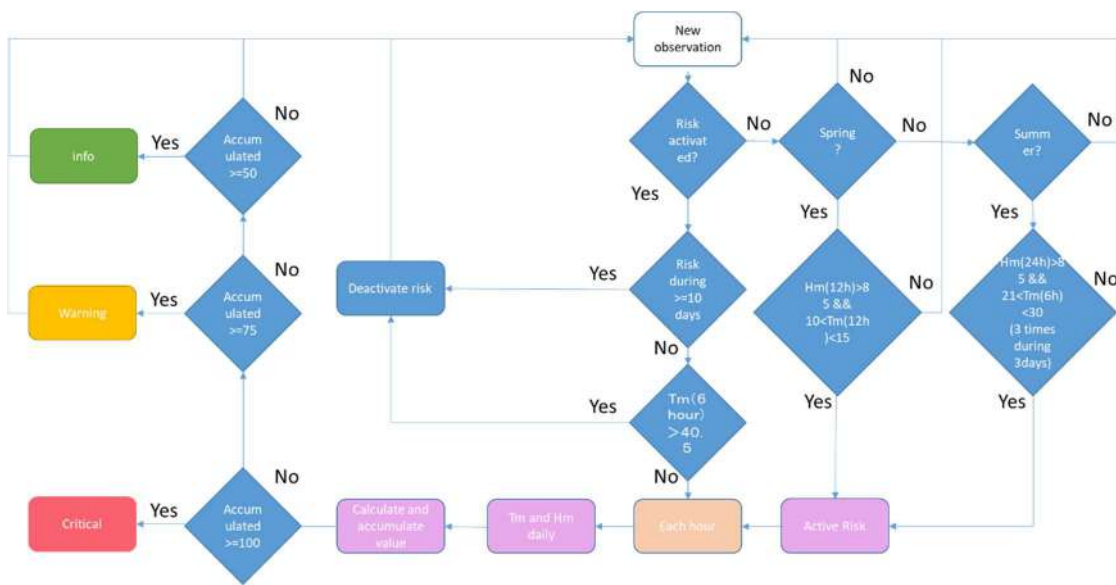


図 14. ベと病の発病リスクアルゴリズム

<晩腐病>

5月頃に発生する晩腐病は、3日間の平均気温の平均値が15℃を上回り、最低気温の平均値が10℃を超え、さらに3日間の合計降水量が10mm以上で形成される。5~7月に最も盛んに胞子の飛散が発生し、6~7月の降雨が多いと一次感染量が多く、成熟期に降雨が多いと先の一次感染量が助長されて激発する。葉と異なり、果実に付着した場合は数時間で発芽し侵入する。果実の酒石酸量に影響し、幼果期では酸が多いため発病することはないが、減酸期ごろから病原菌の活動が盛んとなり発病する。成熟した果実は酸の値が低く糖度が高いため、感染後3~5日で発病し、その翌日には病斑上に分生胞子堆を形成して感染拡大につながる。

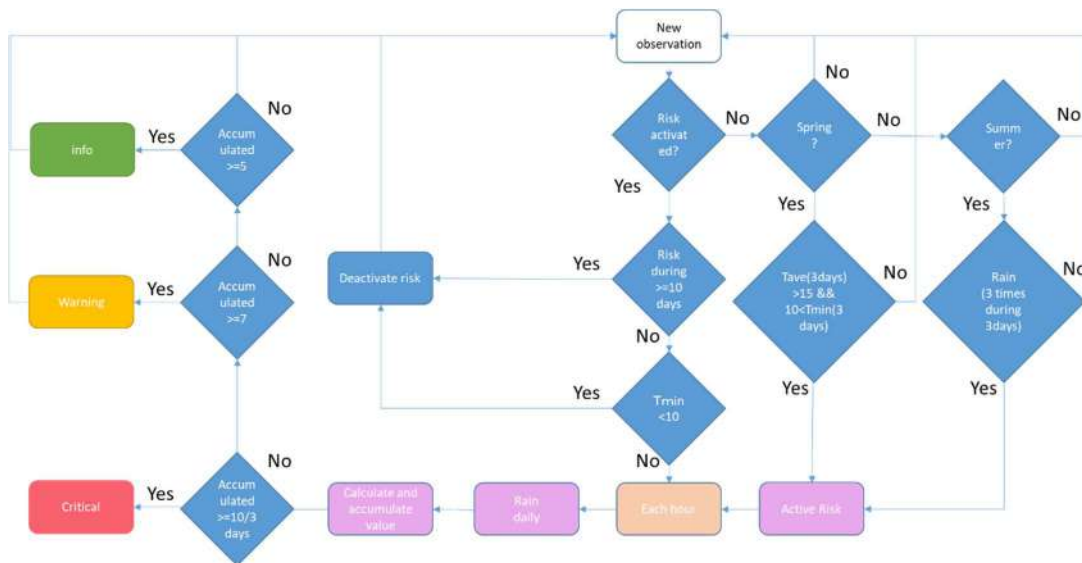


図 15. 晩腐病の発病リスクアルゴリズム

第3章 全体を通じての考察

第1節 研究結果のまとめ

余市町及び仁木町では新規のワイン用ブドウ生産者が近年増加し、ワイン専用品種の栽培面積が増加しているものの、栽培技術が未熟なために病害虫の多発生による減収、収穫遅れ等により品質の低下が散見されている。道内有数のワイン用ブドウ産地である両町においては、ベテラン生産者も存在し、新規就農者への栽培支援なども行われているものの、水稲や畑作物に比べて栽培技術の体系化が十分でなく、農家の経験則や勘による栽培が主流となっているため栽培管理技術に関する生産者間に差が大きく、栽培管理の平準化が遅れている。

これらの地域の課題・問題点を解決するため、センシング技術や気象データ等を活用し、必要なデータを把握、そのデータを基に効果的な病害虫防除や収穫、管理作業が行える栽培管理システムの体系化に資する解析およびモデル構築を行った。

1. ニーズ調査とデータベース定義

センシングシステムの開発にあたっては北海道特有の課題である積雪や広大な圃場面積等から、畑に固定するタイプのセンサ設置による方法は故障のリスクや、コスト面で不利であり、北海道でスマート農業を推進していくためには、自動走行可能な機械、センサが必要であるという結果が得られたことから、自動走行のベースとなる技術開発と、データ構築基盤のシステム設計を実施した。

2. 収穫的期予測・判断材料としての気象データ等の利活用

2.1 環境計測データを活用した栽培効率化の実証と考察

余市町及び仁木町における気象の特徴を捉えるにあたり、アメダスデータおよびベジタリア社がすでに設置している気象観測装置フィールドサーバのデータをもとに取りまとめた。

これら環境計測センサより取得した気象データにより、環境変化による生育状況の変化予兆をいち早く把握することができる。

特に収穫適期を判断する上で重要なファクターとなる有効積算温度を、栽培地により近い環境で把握ができるようになり、より高精度な収穫適期予測が可能となる。さらに日射量や降水量は、後述する樹木内の水分生理を把握する樹液流計測と併用することで、成長期における植物の光合成量をよりの確に把握できるようになり、誘引等、栽培における重要作業判断の一助となりうる。

2.2 樹液流計測による植物生理モデルの構築

気象観測装置から得られる気象データをもとにワインブドウの生理状態、ひいては収穫適期等

をよりの確に予測可能にするためには植物生理モデルの構築が必要となる。そのためには実際の栽培環境において、ワインブドウがどのような生理反応を示しているのか解析する必要がある。そこで、生育期におけるワインブドウ ‘Pinot noir’ の水分生理特性について詳細に調査し以下の解析とモデル構築を行なった。

- 1) 水分生理モデルの構築
- 2) 生育ステージの予測
- 3) 収穫最適日の検討

3. 病害アラーム機能の適用範囲の拡大と有効性検証

ワインブドウ栽培において防除は収量および果実品質を維持するために必要な管理作業である。しかし、どのような環境条件の時に農薬散布をすべきか、感覚的に判断されており、散布タイミングの判断基準に一貫性がないことが病気を抑えられない要因の一つとなっている。特に新規就農者は経験不足から防除タイミングを逃しやすい。そこで、病原菌は特定の環境条件がそろそろと感染しやすくなるため、気象データを用いて各病原菌の感染条件をアラーム発出する機能を実装する。病害アラーム機能の適用病害を拡張すべく、アラームのアルゴリズムを再構築、検討した。

- 3.1 ベと病アラームのアルゴリズム検討
- 3.2 灰カビ病アラームのアルゴリズム検討
- 3.3 晩腐病アラームのアルゴリズム検討

第2節 今後の課題と展望

収量と品質を担保したワインブドウ栽培を実現するためには、病害虫を適切に防除し、最適期に収穫することが重要となる。今回の研究・実証により気象データ、樹液流計測などを活用し、収穫適期予測や病害予察に結びつくデータ解析とモデル構築・アルゴリズム構築を行った。

今後はエクセル等により、これらのモデル・アルゴリズムを用いたシステム開発を行い、農業生産者に実装することによって、適時収穫や病害防除などの生産現場の課題解決に役立てて行く。

また、今後の技術普及を進める上での課題などについて、意識の共有や理解醸成を図っていく。

[引用文献]

[1] Bertamini, Massimo, and N. Nedunchezian. "Photosynthetic functioning of individual grapevine leaves (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) during ontogenesy in the field." (2003): 13-17.

[2] Broome, J.; English, J.; Marois, J.; Latorre, B.; Aviles, J. Development of an infection model for Botrytis bunch rot of grapes based on wetness duration and temperature. *Phytopathology* 1995, 85, 97-102.