

令和 7 年度

博士論文

促成栽培イチゴの生育診断に資する生体計測手法

2026 年 3 月

坪田 将吾

岡山大学大学院

環境生命科学研究科

## 目次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| I 諸論 .....                     | 1  |
| 1. 摘要 .....                    | 1  |
| 2. 研究背景 .....                  | 3  |
| (1) 我が国の施設園芸 .....             | 3  |
| a. 施設園芸の目的と温室の設置状況 .....       | 3  |
| b. 温室における環境制御設備の高度化 .....      | 4  |
| c. 栽培品目 .....                  | 5  |
| (2) 我が国のイチゴ生産 .....            | 6  |
| a. 起源 .....                    | 6  |
| b. 作型 .....                    | 6  |
| c. 品種 .....                    | 7  |
| d. 作付面積、収穫量と単収の推移 .....        | 8  |
| e. 海外輸出 .....                  | 9  |
| (3) 施設園芸における生体情報の計測・活用研究 ..... | 10 |
| (4) イチゴの促成栽培の課題 .....          | 12 |
| 3. 本研究の目的 .....                | 13 |
| II 低温期の生育抑制を評価する生体指標 .....     | 14 |
| 1. はじめに .....                  | 14 |
| 2. 材料及び方法 .....                | 14 |
| (1) 栽培方法 .....                 | 14 |
| (2) 試験区の設定 .....               | 14 |
| (3) 生体情報の調査方法 .....            | 17 |
| 3. 結果及び考察 .....                | 18 |
| (1) 試験区の気温変化 .....             | 18 |
| (2) 評価対象の葉 .....               | 19 |
| (3) 葉柄長 .....                  | 20 |
| (4) 葉面積 .....                  | 23 |
| (5) 総葉面積 .....                 | 25 |
| (6) 新葉発生頻度 .....               | 26 |
| (7) 草高 .....                   | 27 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4. まとめ .....               | 29 |
| III 若葉観測に利用可能な気流条件 .....   | 30 |
| 1. はじめに .....              | 30 |
| 2. 材料及び方法 .....            | 32 |
| (1) 葉が受ける気流と荷重の関係.....     | 32 |
| (2) 葉柄の損傷について .....        | 34 |
| a. 葉柄の形状 .....             | 34 |
| b. 曲げ荷重による損傷.....          | 35 |
| c. 座屈による損傷.....            | 35 |
| d. 株元からの剥離.....            | 36 |
| (3) 利用可能な風速範囲の検討 .....     | 36 |
| 3. 結果及び考察 .....            | 38 |
| (1) 葉が受ける気流と荷重の関係.....     | 38 |
| (2) 葉柄の損傷について .....        | 41 |
| a. 曲げ荷重による損傷.....          | 41 |
| b. 座屈による損傷.....            | 42 |
| c. 株元からの剥離.....            | 43 |
| (3) 利用可能な風速範囲の検討 .....     | 44 |
| 4. まとめ .....               | 47 |
| IV 生長点の露出に必要な気流条件の検討 ..... | 48 |
| 1. はじめに .....              | 48 |
| 2. 材料及び方法 .....            | 49 |
| (1) 実験装置.....              | 49 |
| (2) 露出頻度と露出株割合.....        | 50 |
| (3) 葉柄先端の移動量 .....         | 51 |
| (4) 生長点周辺の隙間領域.....        | 51 |
| 3. 結果及び考察 .....            | 53 |
| (1) 作物条件.....              | 53 |
| (2) 露出頻度と露出株割合.....        | 53 |
| (3) 葉柄先端の移動量 .....         | 54 |
| (4) 生長点周辺の隙間領域.....        | 56 |
| 4. まとめ .....               | 57 |
| V ドローンを用いた移動観測法の検討.....    | 58 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 1. はじめに .....                | 58  |
| 2. 材料及び方法 .....              | 60  |
| (1) 実験装置 .....               | 60  |
| (2) ドローンユニット下方の気流分布 .....    | 61  |
| (3) 気流の作用位置と風速分布 .....       | 62  |
| (4) 気流の作用位置と生長点の視認性 .....    | 62  |
| 3. 結果及び考察 .....              | 64  |
| (1) ドローンユニット下方の気流分布 .....    | 64  |
| (2) 気流の作用位置と風速分布 .....       | 64  |
| (3) 気流の作用位置と生長点の視認性 .....    | 67  |
| 4. まとめ .....                 | 69  |
| VI 移動観測動画を用いた作物個体の識別手法 ..... | 70  |
| 1. はじめに .....                | 70  |
| 2. 材料及び方法 .....              | 71  |
| (1) 供試作物 .....               | 71  |
| (2) 実験装置 .....               | 71  |
| (3) 画像解析法 .....              | 72  |
| a. 作物個体の物体検出モデル .....        | 72  |
| b. 作物個体の識別アルゴリズム .....       | 74  |
| (4) 作物個体識別アルゴリズムの精度検証 .....  | 78  |
| 3. 結果及び考察 .....              | 80  |
| (1) 作物個体の物体検出モデル .....       | 80  |
| (2) 作物個体識別アルゴリズムの精度検証 .....  | 83  |
| 4. まとめ .....                 | 87  |
| VII 結論 .....                 | 88  |
| 参考文献 .....                   | 91  |
| 本論文に関する著者の参考論文 .....         | 99  |
| 謝辞 .....                     | 100 |

## I 諸論

### 1. 摘要

我が国のイチゴ生産は一季なり品種の促成栽培が主流である。高食味なため海外からも需要があり、輸出拡大が目指されている。しかし、作付面積は減少傾向にあり、環境制御設備の高度化などにより単収は増加しているものの、生産量の低下は防ぎきれていない。また、生体情報を活用した環境制御や栽培管理、収量予測により、更なる生産性の向上が目指されているが、栽培現場で広く活用されるようには至っていない。この原因の一つとして、イチゴの促成栽培が、休眠などの特有な生理状態の変化を伴う作型であることが挙げられる。休眠の状態を制御することは難しく、生産現場では勘と経験に頼っており、客観的な指標がない。そこで本論文では、イチゴの生理状態を評価するのに適した生体指標を明らかにし、これを省力的に観測する手法を開発することを研究目的とする。

まず、気温の異なる 3 つの試験区で栽培期間を通じて生育を調査、比較した結果、新生第 3 葉までの若葉の草高、葉柄長及び葉面積といった生体情報の経時変化に、生理状態によると考えられる違いが見られた。また、第 3 葉よりも若い第 2 葉の方が、生理状態の変化が早期に形態変化として確認できることから、指標として有効であった。最も若い新葉では、生長が旺盛なため、調査のタイミングによって変動が大きく指標としての使用が困難であったが、自動計測等により高頻度な観測を行い、時間軸と合わせて指標化できれば、更に有効な指標となると推察された。さらに、試験区の気温差は温室内で容易に起こり得るばらつきの範囲内であったことから、生産性向上のためには、より多くの株の情報を把握することが有効と考えられた。

しかし、新葉や第 2 葉といった若葉は、古い葉の下側にある生長点から発生するため、視認性が悪い。このため、株の上方から気流を加え、周囲の葉を生長点から見て外側に押し広げて観測することを着想し、これが実現可能かを検証した。まず、気流を加えると葉が損傷するリスクが生じるため、葉が損傷しない風速範囲を調べた。葉身の抗力係数が風速の増加に伴い漸減することを明らかにし、風速と葉面積から風荷重を推定する式を求めた。そして、葉柄の曲げ応力・モーメント、ヤング率といった物理特性を明らかにし、葉身が受けた風荷重から葉柄が損傷しない風速のしきい値は 10 m/s 程度と試算した。一方で、株上方からの気流で株内部にある生長点を露出させるのに必要な条件を検討した。風洞実験で直上から送風した結果、風速 6 m/s で供試株の 95 %で生長点が露出し、

新葉や第 2 葉が着葉する生長点周辺の露出空間の視認性も十分向上した。これらの結果から、株上方からの気流によって、株を損傷せずに若葉を露出させる気流条件が明らかとなった。

次に、株に気流を加える方法として、ドローン（クアッドコプタ）のダウンウォッシュ（下降気流）の利用を検討した。ダウンウォッシュは 4 枚のプロペラの内側で風洞と同じように円筒状の強い気流を形成しており、今回の観測に活用しやすいものと考えられた。またプロペラからの距離に比例して風速が減衰することが確認され、飛行高度によって風速を調整できるものと考えられた。空撮用カメラを搭載し、葉身に風速 6 m/s が作用するよう作物列直上を移動させながら撮影した結果、株の上を移動する間に生長点が露出する頻度は 76 %と高かった。また、移動しながら撮影するので、作物を異なる角度から観察することができ、供試した全株で生長点を露出させることが可能であった。以上より、ドローンの作物列上の移動観測により、多数の株の若葉を省力的に観測できることが明らかとなった。

さらに、安定した衛星測位が困難な温室内において、GNSS (Global Navigation Satellite System) を利用しないドローンが作物列に沿って空撮した映像だけを用いて、個々の株を識別する画像処理技術を開発した。映像は連続する静止面のフレームとして処理し、フレーム内に撮像された作物に順次 ID を割り当てた。作物領域の推定には深層学習の物体検出モデルを使用し、ID は処理前後のフレーム間の作物数の差に基づいて決定した。また株間や畝間といった植え付け位置の規則性を用いて物体検出による誤検出や未検出を補完した。その結果、物体検出モデルの F 値は 95 %であったが、本処理手法によって株の識別に成功する確率は 99.7 %と高まった。また、一度識別に失敗したとしても、連続するフレームを処理する過程で失敗し続けることはなく、結果として全ての作物に正しく ID を割り当てることが可能であった。

以上のように、促成栽培イチゴの生育診断に重要な新葉や第 2 葉を省力的に観測し、株の植付け位置までを自動的に識別する計測技術を開発した。今後、日々観測された映像から、識別された株を経時比較する画像処理手法を開発することで、温室内の多くの株の生理状態を定量的に診断することを可能としたい。

## 2. 研究背景

### (1) 我が国の施設園芸

#### a. 施設園芸の目的と温室の設置状況

施設園芸は、被覆資材によって栽培空間と外界を遮断して作物を栽培する生産方法である。被覆資材は大きくガラスとプラスチックに分類される。ガラス室やプラスチックハウスは温室と総称され（川島，2015），外気温が作物の生育温度下回る低温期に，栽培可能な温度環境を作り出そうとしたことが起源とされる（林，2015）。

我が国においては，消費者ニーズにこたえるため，園芸作物の周年安定供給が必須となっている。温室生産は，露地栽培では創出できない好適な環境条件で栽培を行うことにより，園芸作物の周年出荷に貢献している（農林水産省，R6）。

農林水産省の統計によると，温室の実設置面積は2022年には37,907 haであり，1999年から減少傾向が続いている（農林水産省，2023a）（図 I-1）。これには，我が国の高齢化・少子化による労働力減少と内需縮小が少なからず影響しているものと考えられる（星，2019）。

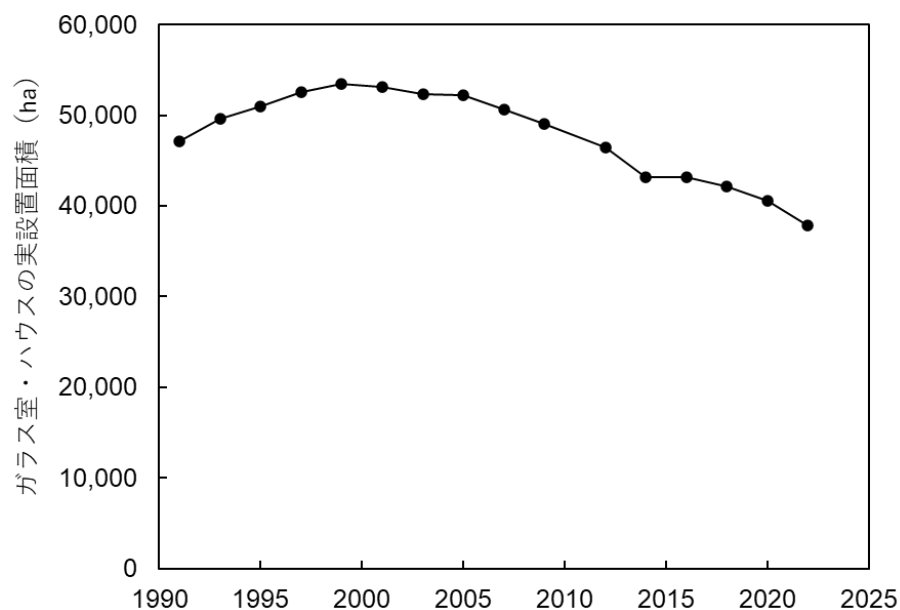


図 I-1 ガラス室・ハウスの実設置面積の推移

(R5 農林水産省統計資料より作成)

#### b. 温室における環境制御設備の高度化

近年、温室内の環境制御設備の高度化が進みつつある。農林水産省の統計によると、1991 年には既に普及が進んでいた加温設備や換気扇・循環扇に加えて、保温や光環境調節を行う 2 層以上のカーテン装置や、光合成を促進できる炭酸ガス発生装置のある温室数が増加している。さらに、これらの設備を効果的に制御する、ICT（Information Communication Technology）を活用した高度な環境制御装置の導入が進んでいる。設置温室数は、1991 年から 2022 年までで 3.5 倍となり、1,302 ha に達している（農林水産省、2023）（図 I-2）。センサの計測値等に基づき、温度、湿度、光、二酸化炭素濃度といった複数の環境条件を、作物の生育にとってより良い環境に制御することで、効率的で生産性の高い栽培が目指されている。

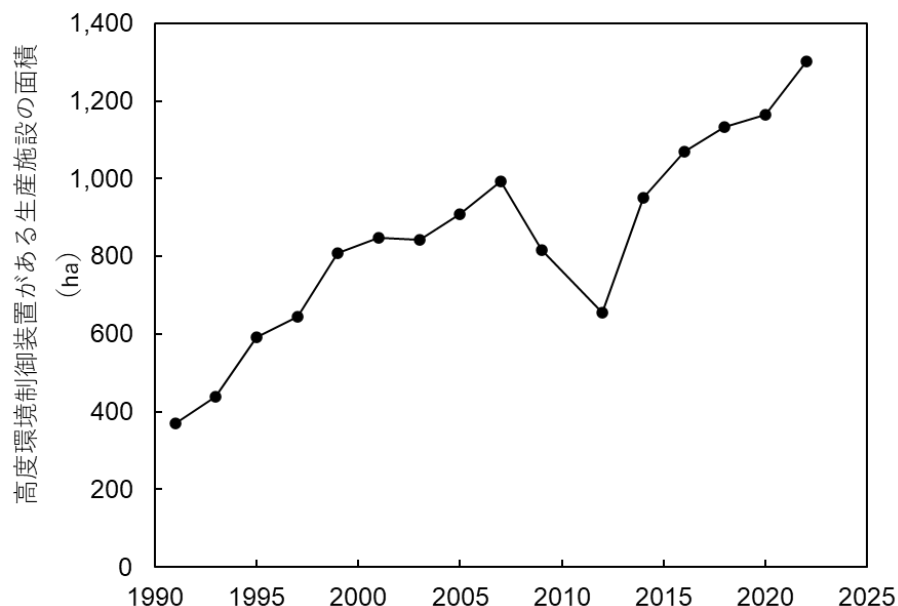


図 I-2 高度な環境制御装置が設置されたガラス室・ハウスの面積  
(R5 農林水産省統計資料より作成)

### c. 栽培品目

施設園芸で栽培される作物には、野菜、花き及び果樹があり、作付の7割以上は野菜である。野菜の栽培品目は、主に葉菜類や果菜類であり、延べ作付面積はトマト、ハウレンソウ、イチゴ、キュウリの順で多い（農林水産省、2022a）（図I-3）。また、産出額では、トマト、イチゴ、ネギ、キュウリの順で高い（農林水産省、2022b）（図I-4）。このように、作付面積、産出額ともに品目別で3位以内のイチゴは、我が国の施設園芸において重要な品目の一つと言える。

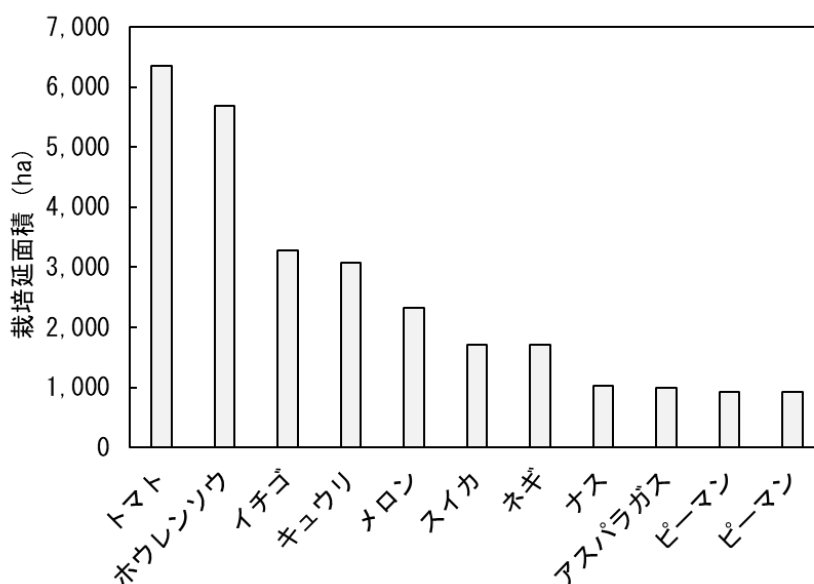


図 I - 3 主要な施設園芸品目の栽培延面積（R4 農林水産省統計資料より作成）

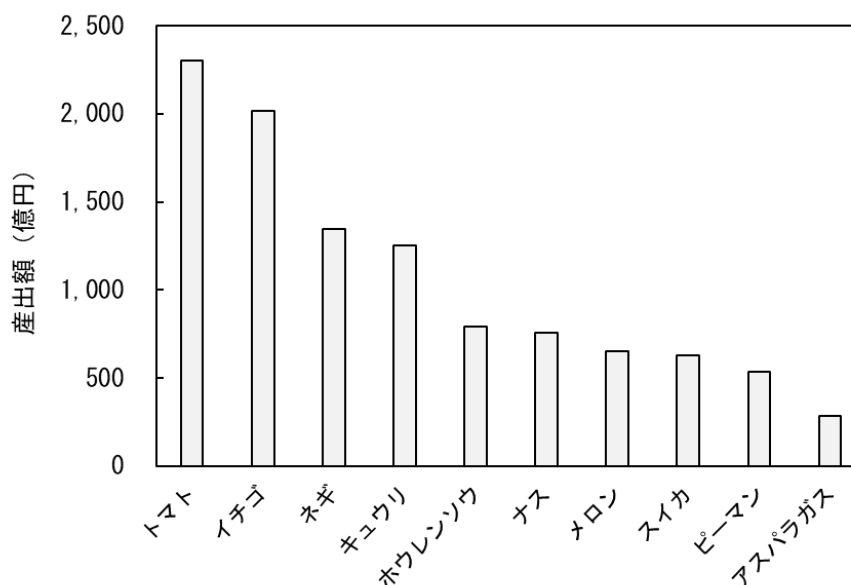


図 I - 4 主要な施設園芸品目の産出額（R4 農林水産省統計資料より作成）

## (2) 我が国のイチゴ生産

### a. 起源

現在、食用に栽培されているイチゴ (*F. × ananassa*) は、野生種の *F. chilonesis* と *F. virginiana* の交雑によって生まれた 8 倍体の雑種である。1700 年代中期にオランダで交雑され、ヨーロッパや北米で改良が重ねられた後、世界中に広がった。我が国では、伝来後、定着し、営利栽培が始まったのは明治 30 年代に入ってからである (森下, 2014a)。

### b. 作型

現在の普及しているイチゴの作型は、大きく促成栽培と夏秋どり栽培に分けられる。促成栽培は、露地 (普通) 栽培から、早熟栽培、半促成栽培を経て、収穫開始時期の前進化を目指して開発されてきた作型である。図 I-5 に示すように、露地栽培や早熟栽培では、秋に定植後、春に 1 か月程度の間、収穫できるのみであった。品種改良、温室生産による保温・加温、電照及びジベレリン処理等の技術開発によって、半促成栽培では 3 月頃から 5 月頃まで、促成栽培では 12 月頃から翌年 5 月までの半年間、同じ株から継続的に収穫を行うことが可能になった。このような作型開発による生産性の向上により、1964 年では露地栽培が約 6 割であったが、近年では促成栽培が全体の約 9 割を占めている。また、夏秋どり栽培は、促成栽培で収穫できない 6 月から 10 月頃に収穫する作型である (森下, 2014b)。

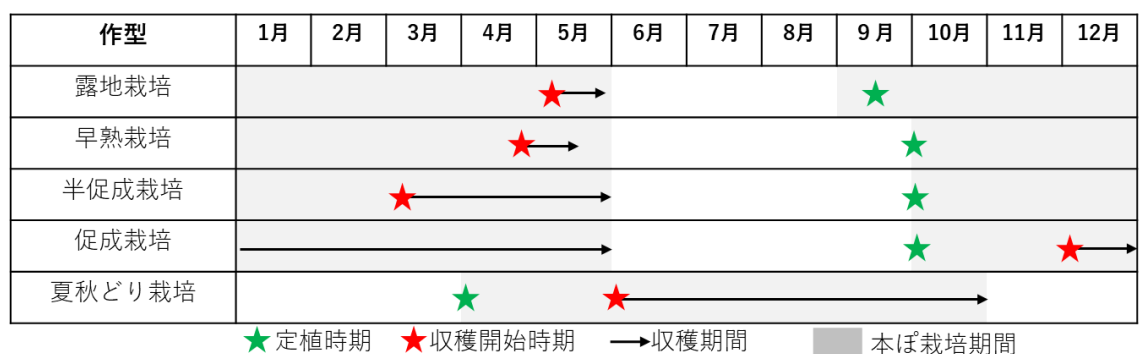


図 I-5 主要作型における一般的な収穫開始時期及び本ぽ栽培・収穫期間  
(森下, 2014b を基に作成)

### c. 品種

イチゴの品種は、約 300 種類と非常に多い。近年では、県などが中心となって品種改良が重ねられ、ご当地ブランドとなるイチゴが生み出されている（農林水産省，2019）。品種別の作付面積割合をみると（栃木県，2021），主力品種以外のその他の品種が約 1/4 を占めていることから、品種の多様化が進んでいることがうかがえる。一方で、約 1/4 を占める「とちおとめ」を筆頭に、4 品種で作付面積の半分を占めていることも特徴である（図 I-6）。

また、品種には、主に促成栽培用品種として育成されてきた一季成り性品種と四季成り性品種がある。上述の通り、我が国の作型は促成栽培が主流なため、図 I-6 に示す主要な品種は一季なり品種である。四季成り性品種には、例えば農研機構などが開発した「よつぼし」があり、低温・短日条件で花芽分化しやすい一季成り性品種に比べ、高温・長日条件で花芽分化しやすい特性を有する（沖村，2012）。促成栽培でも作付けされるが、夏秋どり栽培に利用されることが多い。

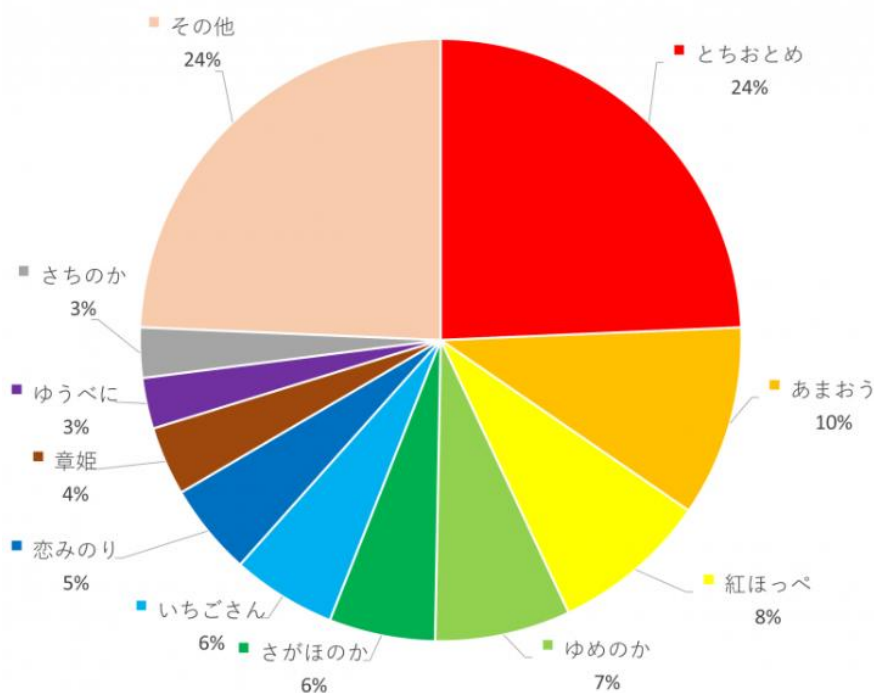


図 I-6 全国のイチゴ品種別面積割合（令和 3 年度）  
（栃木県ホームページより引用）

#### d. 作付面積、収穫量と単収の推移

我が国のイチゴの作付面積は施設園芸全体と同様に継続的に減少している。具体的には、1991年には9,830 ha あったが、2023年には4,780 ha まで半減しており、減少率が高い（農林水産省、2025a）（図 I -7）。作付面積の減少に伴って収穫量も減少しており、1991年の213,300 t から2023年には161,800 t となった。この間、「とちおとめ」、「紅ほっぺ」や「あまおう」といった多収品種の開発や、環境制御装置及び養液栽培（農林水産省、2020）（図 I -8）等の生産技術の向上により、単収が2.2 t/10a から3.4 t/10a まで約1.6倍に増加した。そのため、収穫量は半減するには至っていない。しかしながら、こうした技術開発によっても、作付面積の減少分を十分に補うことはできていない。

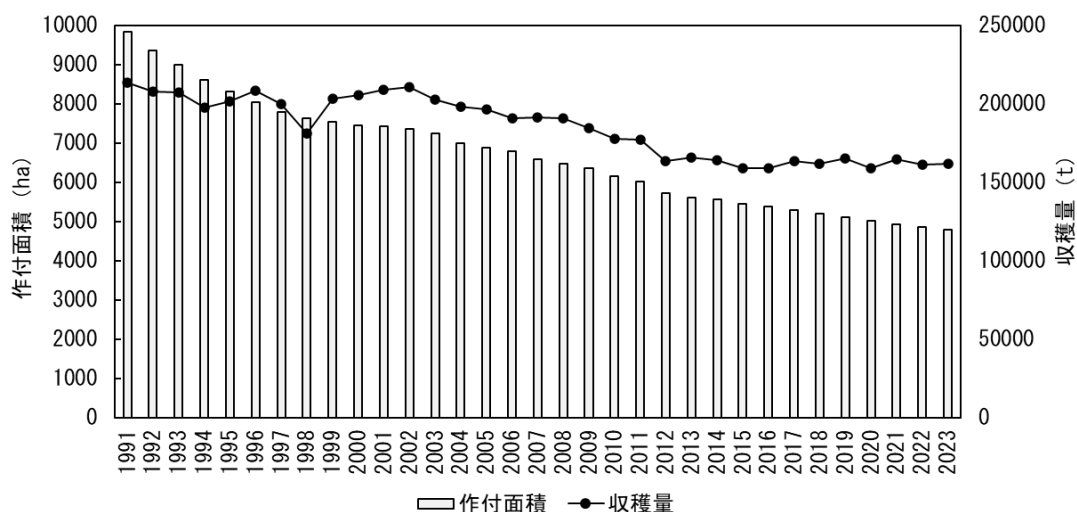


図 I -7 イチゴの作付面積と収穫量の推移（R4 農林水産省統計資料より作成）

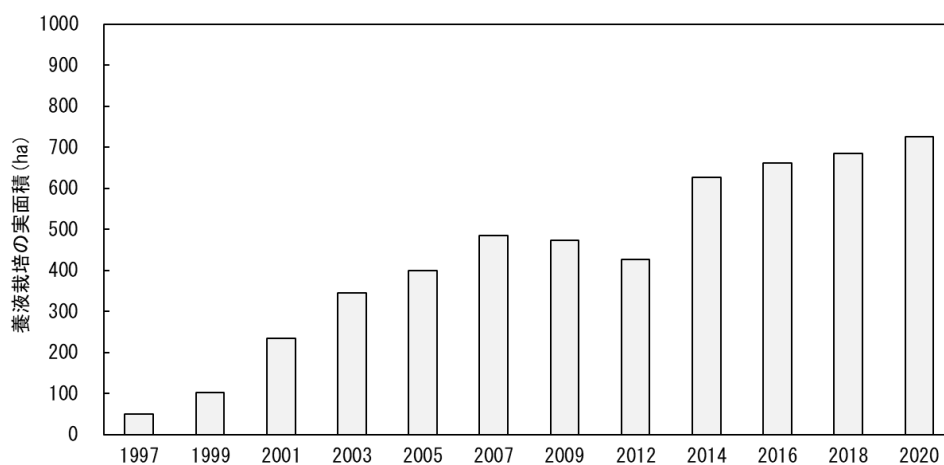


図 I -8 イチゴの養液栽培実面積の推移（R2 農林水産省統計資料より作成）

#### e. 海外輸出

我が国のイチゴは、独自の品種改良が進んだことにより、食味が良く、海外でも人気が高い。2013年に国策として掲げられた「攻めの農林水産業」（農林水産省、2013）の追い風も受け、輸出額は2023年には61.6億円と、2013年からの10年間で25倍程度にまで増加した（図I-9）（農林水産省、2023b）。イチゴの輸出拡大は、人口減少による国内市場の縮小への対応策としても重要であり、更に、2030年に253億円を達成する目標が掲げられている（農林水産省、2025b）。

また現在の輸出先は香港、台湾といった東アジア圏が中心である。この原因として、輸送時の品質維持が挙げられるが、振動等に強い輸送用容器（柏寄、2024）、好適な輸送時の環境条件（兼田ら、2021）、及び、流通中の損傷発生に強い品種（遠藤ら、2020）などの研究や開発も進んでおり、東南アジアやヨーロッパへの輸送の可能性も見込まれている。

以上より、今後さらなる輸出拡大の可能性を見込むことができる。

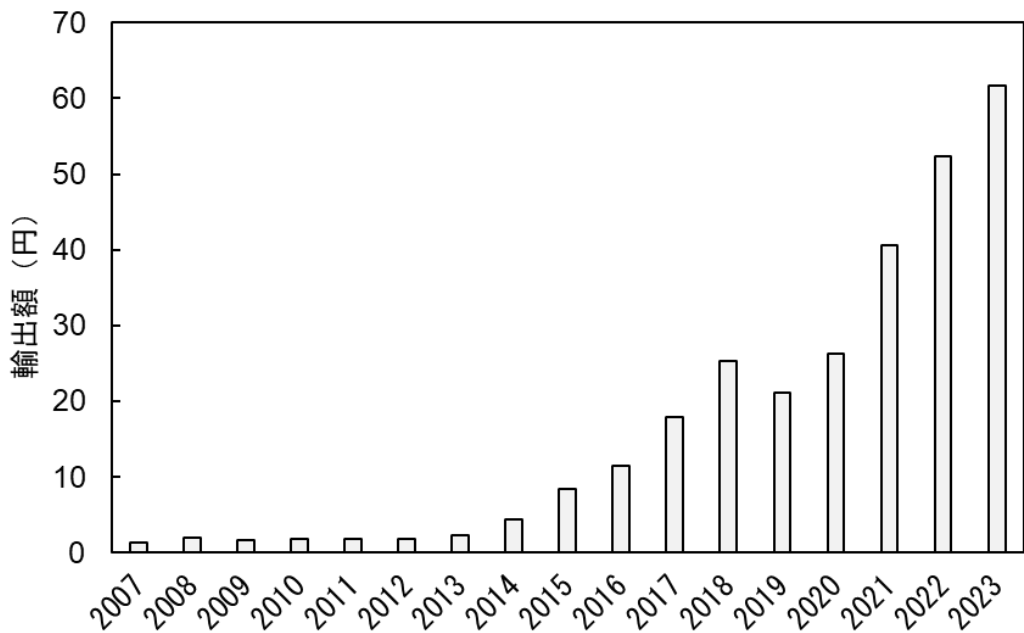


図 I -9 イチゴの輸出額の推移(R5 農林水産省統計より作成)

### (3) 施設園芸における生体情報の計測・活用研究

輸出拡大に向け、作付面積や収穫量の減少を抑えるための方策として、生体情報の活用が挙げられる。普及が進む、高度な環境制御装置を最大限に生かし、生産量を最大化するためには、環境情報に加えて生体情報を用いた生育の解析が必要なためである（岩崎，2015）。しかし、人手で生体情報の計測を行うことには労力的にも、速度的にも限界があるため、省力的な生体計測技術が研究されてきた。

植物生体情報の省力的な計測方法には様々な方法があるが、非接触で広範囲の情報を収集することにたけた画像計測は最も有望な手法である（橋本ら，2012）。このため、RGB カメラを用いた計測技術が古くから研究されてきた。例えば、生育管理の自動化のために、側方からの撮影でキュウリの葉を識別する画像認識技術（西ら，1997）が開発された。また、水ストレスの診断のためのトマトの葉の投影面積の計測技術（高山ら，2009）が開発された。また、果実を対象にした例もあり、メロン果実の投影面積の経時変化から生長量を計測する技術が開発された（張ら，2012）。一方で、生長解析における3次元的な情報の重要性に着目し、複数のRGB カメラを用いて、トマトの葉の傾斜角の計測技術（庄野ら，1996）やハウレンソウの葉運動の計測技術（星ら，1995）が研究されてきた。

2010年代には、距離情報を2次元的に計測できる光学計測技術の発展に伴い、植物の3次元情報をより簡易に得ることが可能となり、研究開発が加速した。特に、マイクロソフト社製のKinect センサは安価なことで注目を浴び、その利用研究が進んだ。例えば、深度情報を用いたトマトやパプリカの受光態勢の評価（浜本ら，2015）、パプリカの草高計測による生長解析（黒崎ら，2017）の研究が行われた。イチゴにおいても、群落の3次元形状を用いた生長解析（Yamamoto et al., 2015）や生育量と受光量の定量化（Takahashi et al., 2020）などの研究が進められた。Kinect センサ以外にもTof（Time of flight）カメラを用いて、イチゴの着果数（坪田ら，2015）や着果の直径（坪田ら，2016）を計測する技術開発が行われた。

近年、機械学習技術の進展が著しい。畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network）を代表とする深層学習モデルの活用により、従来の画像処理では困難であった実栽培環境下における多様な光条件や複雑な背景条件下での物体検出が可能となった。この技術を基盤として、生体情報を活用したスマート生産に向けた研究開発がさらに加速している。例えばトマトを対象に、実栽培環境における、着果計数技術（Afonso et al., 2020）、果実成熟

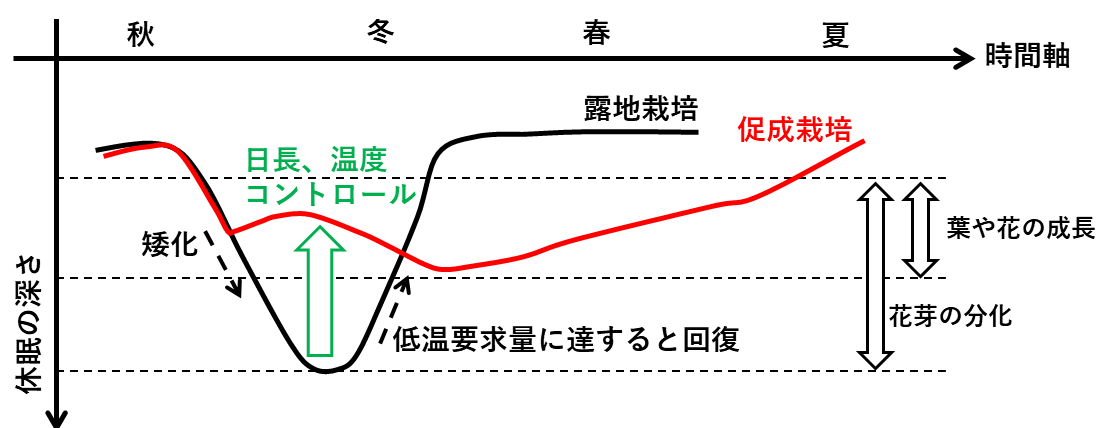
の追跡技術 (Timprae et al., 2025) や葉面積の計測技術 (Naito et al., 2025) が開発された。また 3 次元計測と機械学習技術を組み合わせた研究例もあり，例えば，温室内のパプリカの着果計数 (Viveros Escamilla et al., 2024) やレタスの生育指標の推定が試みられている (Gang et al., 2022)。イチゴにおいても，実栽培環境下でクラウン径，葉柄長，草丈，花，葉及び果実サイズを認識するツール (Ndikumana et al., 2024) や，草高・葉量，花・果実数を自動計測するイチゴ生育調査ウェブアプリ (高山, 2023) が開発されるなど，生長解析や収量予測にとって基本的な生体情報を計測する技術が開発されている。

しかしながら，現状では，これらの技術が生産現場に広く普及し，生産性の向上に活用されるには至っていない。

#### (4) イチゴの促成栽培の課題

ここまで述べて通り、我が国のイチゴ生産においては、単収の向上をはじめとする生産性の改善が強く求められている。このため、生体情報の計測に関する研究開発が進められてきたが、生産現場に広く普及するに至っていない。本研究では、この要因について、イチゴの促成栽培の特殊性から以下のように問題を提起する。

イチゴの促成栽培は、一季なり品種の生理状態をコントロールすることで、露地栽培では1か月程度しかなかった収穫期間を飛躍的に延ばすことに成功した作型である。これは、次の2つの技術により実現している。一つ目は、イチゴの花芽の分化が、低温、短日条件によって促進される（江口，1932）ことを利用した、苗の夜冷短日処理による収穫開始時期の前進化である（植木，1993）。二つ目は、低温短日条件によって株が矮化する（Dallow and Waldo, 1933）、休眠と呼ばれる生理現象に対応するものである。この現象により露地栽培では、秋ごろから生育が低下する。その後覚醒し、厳寒期を経て5月頃収穫に至る。一方、促成栽培では、イチゴの休眠が種子や果樹のように完全に生育を停止しない（森下，2014c）、相対的なものであること、及び、休眠から覚醒しない間は花芽を繰り返し分化することを利用し、気温や日長などの環境条件をコントロールすることで12月から5月頃までの収穫を可能とした（図I-10）。このため、イチゴ促成栽培においては、単純に群落の葉面積や着花・着果数などの生体情報では不十分で、休眠の状態に基づく環境制御を施すことが重要となる。



図I-10 イチゴ促成栽培における休眠の概念図（植松，1998を参考に作成）

しかし、休眠は、生化学物質の活性状態などによる内部的な状態変化であることから、形態の変化から直接的な評価をすることが難しい。このため、間接的に評価する方法として、冬期、保温を開始する時期によって栄養成長の旺盛さに差が出る（李ら、1968；1970）ことが利用されている。言い換えると、休眠には程度があり、一般に生育量が低下するほど程度が深いと表現している。例えば、西沢ら（1989）は、低温、短日条件で栽培中の作物を高温、長日条件に移して 30 日間栽培したときの新生第 3 葉の葉柄長を計測して休眠の深さを相対的に区別した。

一方、休眠以外に、着果による負荷によっても、株の見かけ上の生育が抑制されることが知られている（竹内、1997）。これらを外観の計測から区別することは難しく、休眠自体も発生のメカニズムや生理現象が明らかにされていないため定義が曖昧である。このため、本研究ではイチゴ促成栽培において生育が減衰するような状態を総じて「生育抑制状態」と呼ぶこととする。

生育抑制状態の、生産者に向けた指針として、新生第 3 葉の葉柄長や草丈の目標値が示されている（栃木県農業試験場、2001；愛媛県農林水産研究所、2010 等）。この第 3 葉を計測する方法は有用で簡単であるため現場でも受け入れられているが、リアルタイムな生育評価ができていないかには疑問が残る。これは、第 3 葉は新生してから既に数週間が経過しており、形態的な変化がいつの状態を反映したものであるかが明らかにされていないためである。このため、生産者は目標の葉柄長を実現するため、勘と経験に頼って環境制御や育成管理作業を行っている。

### 3. 本研究の目的

以上の背景より、本研究では、促成栽培イチゴの生育診断に適した生体指標を明らかにするとともに、省力的に生体計測を行なうための画像観測手法を開発することを目的とする。

## II 低温期の生育抑制を評価する生体指標

### 1. はじめに

第 I 章で述べた通り，促成栽培イチゴでは，休眠等の生理状態を含む低温期の生育抑制を評価するのに適した生体指標が明確にされていない。

このため，本章では，低温期の生育抑制状態の程度を推定することに適した生体指標について，3 種類の気温条件下で栽培した試験区で生育調査を行って検討した。

### 2. 材料及び方法

#### (1) 栽培方法

農研機構・農業技術革新工学研究センター（つくば市）の温室（暖房設備付，長さ 10.1 m×幅 19.8 m，フィルム材質：直鎖状低密度ポリエチレン及びエチレン酢酸ビニル共重合体，厚さ 0.15 mm）内において，2018 年 9 月 24 日に品種「とちおとめ」を株間 200 mm（ちどり植え，12 株/栽培ベッド）で定植した。栽培は高設栽培で行い，栽培棚の設置高は 1m，栽培ベッドは長さ 1200 mm×幅 300 mm×深さ 120 mm のものを用いた。培地はピート（トヨタネ社製，BVB）とし，肥料は粒状肥料（誠和社製，ベリーエナジーex）を株あたり N：3.3 g，P：2.3 g，K：3.3 g となるよう施与した。また，週 1 回程度の農薬散布を行い，病虫害が生育に影響を及ぼさないように努めた。散布した農薬は，一般的な殺虫剤，殺菌剤等計 9 種類で特にダニへの対策としてローテーションした。その他，黄化した葉は適時摘葉するとともに，生育不良により発達が見られない花，果実は摘除した。

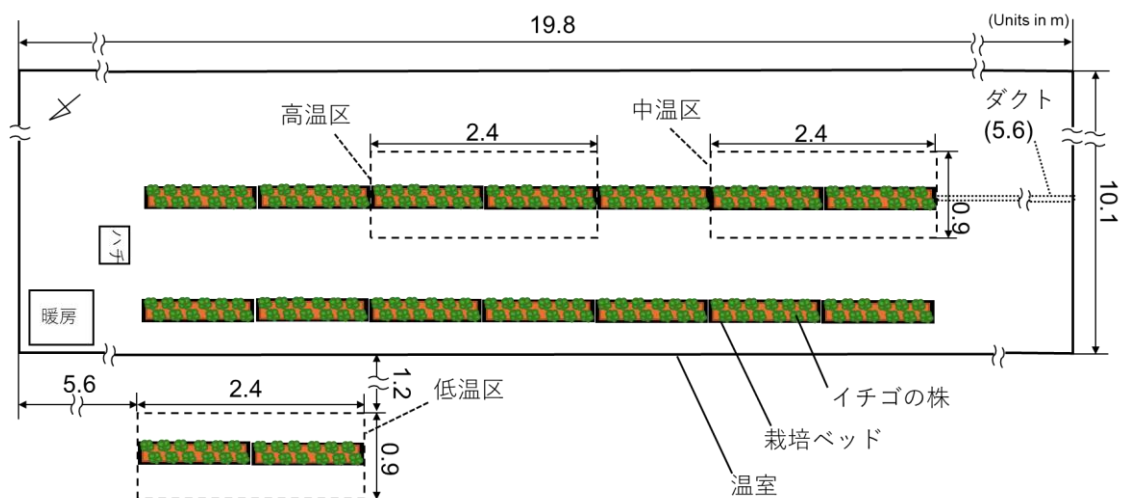
#### (2) 試験区の設定

試験区（図 II-1）は，生育抑制状態に差をつけることを狙い，気温の異なる 3 区を設けた。まず，「とちおとめ」の栽培指針（栃木県農業試験場，2001）に基づき，最低気温が 8℃を下回らない区を高温区，外気を取り込むことで高温区より最低気温が低い区を中温区及び加温を行わない区を低温区と定義し，それぞれの実験区に小型ハウスを設置して 11 月 8 日に処理を開始した。なお，低温区はビニル温室内から野外の小型ハウスに栽培ベッドを移動した。

高温区と中温区は，ビニル温室の中に農業用ポリエチレンフィルム（材質：直鎖状低密度ポリエチレン，厚さ 0.1 mm）で被覆した小型ハウス（長さ 2400 mm×幅 900 mm×高さ 1500 mm）を作り，2 台の栽培ベッドで計 24 株を高設栽培した。小型ハウスには，通風用に直径 200 mm の穴を 2 カ所開け，中温区には外の空気

を流出入させるためのダクトを設置した。ダクトは直径 200 mm でイチゴ株より上方と下方に設置し、下方ダクトには送風機を取り付けて排気することで、外部の寒気が作物上方から下方へと流れるようにした。低温区は、温室外（野外）に小型ハウスを設置し、暖房設備を設置しないこと以外は温室内と同様に高設栽培した。高温区と中温区を設置したビニル温室では、暖房を最低気温 13℃に設定し、受粉のためにクロマルハナバチ（ArystaLifeScience 社製、ミニポールブラック）を放飼した。ハチが授粉作業を行えるよう、日中は小型ハウスの側面を開放した。低温区では、ハチを常設するには面積が狭く、高温区や中温区と同様日中に側面を開放するとハチが逃避すると考えられるため、2, 3 日に 1 回、接触振動型授粉装置（タキイ種苗社製、TS-550）で花を揺らして受粉を促した。

試験区の気温は、各試験区に設置した 2 台の栽培ベッドの長手方向の中心、栽培ベッドの培地表面から高さ 0.4 m 付近に気温データロガ (T&D 社製, TR-72nw) を設置して 1 時間おきに記録した。なお、野外の低温区とビニル温室内の高・中温区では気温以外の環境条件も異なるが、今回検討する休眠などの生育抑制には日長と気温が主に関係するとされているため、比較検討に用いても問題無いと判断した。



(a) 試験区の概要（温室内上面図）



(b) 実験用温室



(c) 試験区の様子

図Ⅱ-1 試験区（上面図）

### (3) 生体情報の調査方法

各試験区において、両端の 2 株は小型ハウスの農業用ビニルに接触する場合があったため対象外とし、調査対象は 22 株とした。ただし、栽培や調査を行う中で葉の折れやちぎれが発生した場合や、病虫害などによって明らかな異常があった場合はその都度計測対象から除外した。

11 月 12 日から 3 月 22 日の間、各試験区についておよそ 1 週間（最短 5 日、最長 10 日）おきに作物の生体情報を調査した。発生した葉には順次タグをつけて識別し、各葉の草高、葉面積及び葉柄長を計測した。ここで、ある瞬間において、株の中で一番新しい葉を「新葉」、それ以前に発生した葉を「第 2 葉」、「第 3 葉」の順で記すこととする。

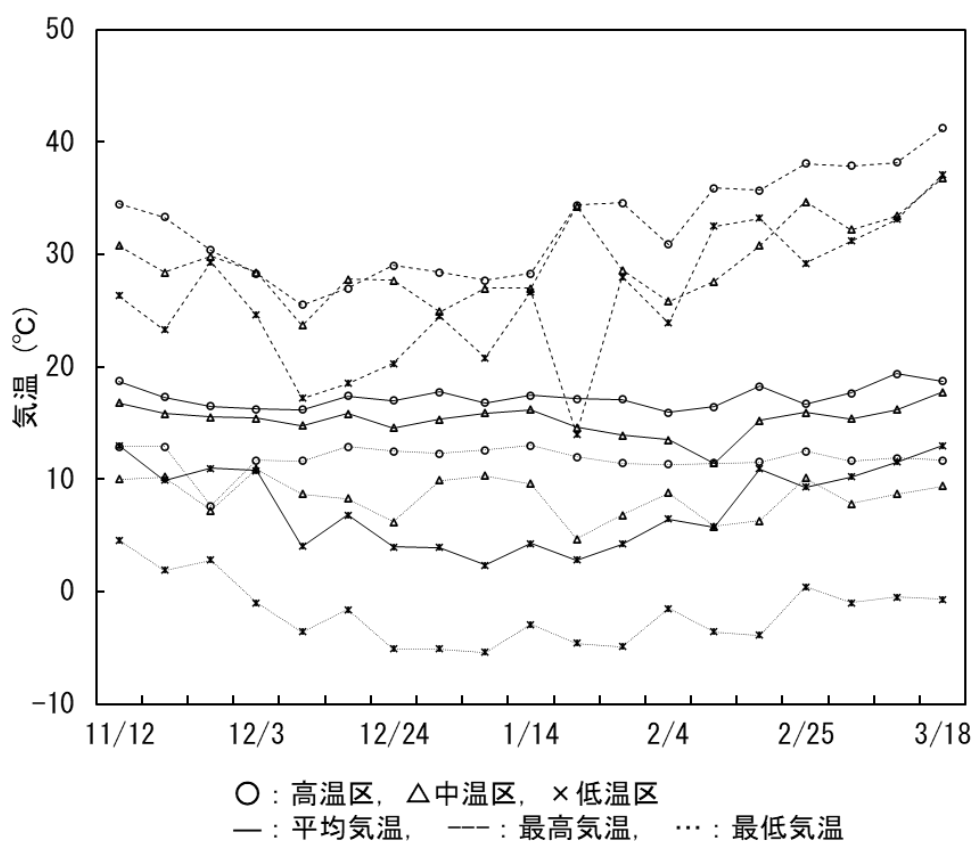
12 月 24 日の週までは各株全ての葉について調査し、それ以降は古い葉に成長に伴う変化が見られなくなったため、新葉から第 4 葉までの個葉を対象に計測した。草高は、栽培ベッドの培地面から葉の最も高い部分までの高さを直尺で計測した。葉柄長は、葉柄の生え際（株元）から葉の分岐点までの長さとし、テープメジャーによって計測した。

葉面積は、葉同士の重なりが無くなるよう白い布で対象とする葉の下を覆い、デジタルカメラ（カシオ社製、EX-ZR850）によって葉面から 30 cm の距離で撮影した後、画像処理ソフト（ライブラリ：MVTec 社製、HALCON）を用いて葉領域を抽出し推定した。このデジタルカメラを用いた葉面積計測は、事前に葉 33 枚を供試し画像処理した後、複写機（OKI 社製、MC363dnw）によって葉をスキャンして算出した面積を真値として精度を評価した結果、供試した葉は平均  $3956 \text{ mm}^2$ （ $717\sim 9585 \text{ mm}^2$ ）であり、決定係数 0.98、RMS 誤差  $556 \text{ mm}^2$ であったことから良好に推定可能と判断した。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 試験区の気温変化

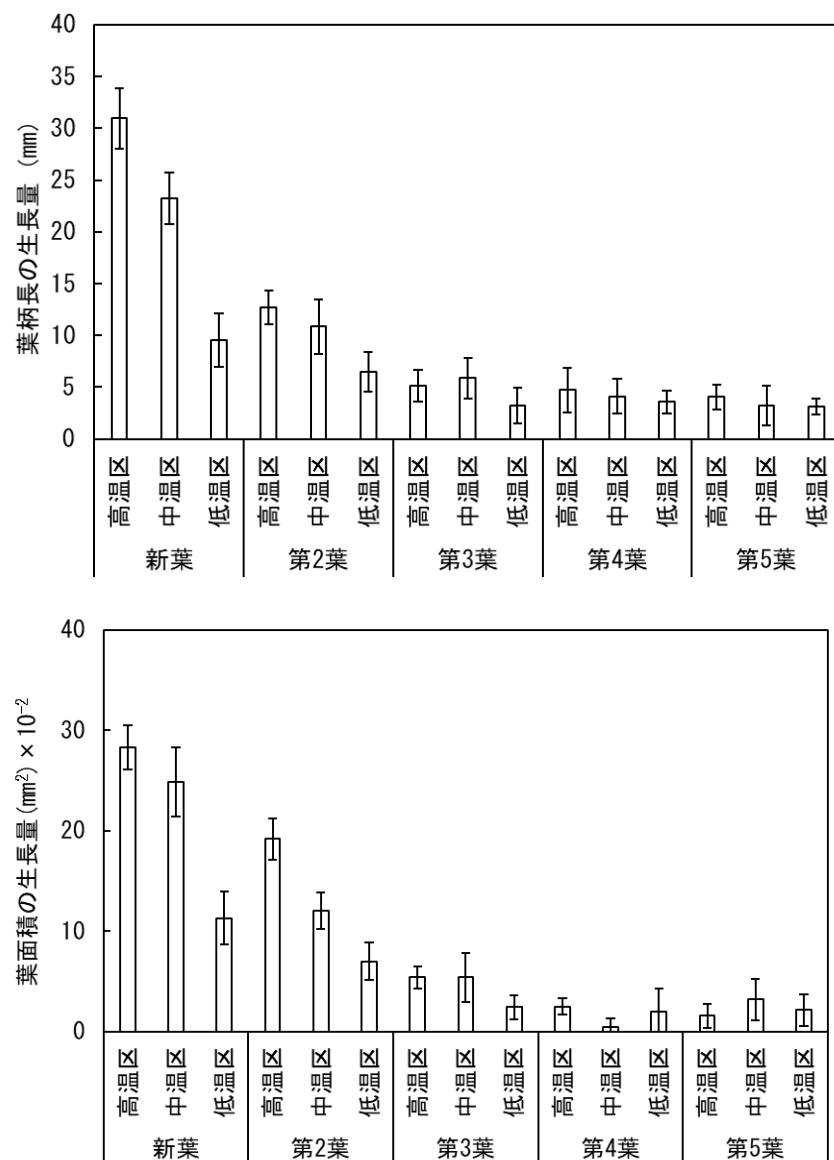
実験期間中の気温変化を図Ⅱ-2に示す。平均気温は、高温区 17.3℃、中温区 15.3℃、低温区 7.6℃であった。また、最低気温と最高気温の平均は、高温区で 11.9℃と 32.6℃、中温区で 8.4℃と 29.5℃、低温区で-1.9℃と 26.0℃であった。高温区では、「とちおとめ」を促成栽培する栽培指針の目標夜温である 8℃を下回ったのは 11月18日の週のみであった。中温区では、高温区より 2 から 3℃低く推移し、夜温は、目標の 8℃前後であった。低温区では加温を行わなかったため、4週目以降の最低気温は零下であった。



図Ⅱ-2 各試験区の気温変化

## (2) 評価対象の葉

調査した生体情報の経時変化から生育抑制状態を評価することについて検討した。本調査において、第3葉よりも古い葉になると生長がほぼ完了し、葉面積と葉柄長が変わらなくなることが観察された。図Ⅱ-3に11月12日から12月24日までの7週間における、出生順別の葉柄長と葉面積の週当たり変化量を示す。これより、既存の評価指標である第3葉とそれよりも若い第2葉と新葉に着目して考察することとした。また、若い葉ほど数値が大きく、差異を捉えやすいことが期待された。



\*n=22 株, 11/12~12/24, エラーバーは標準偏差を表す。

図Ⅱ-3 出生順別の葉柄長と葉面積の週当たり変化量の平均値

### (3) 葉柄長

図Ⅱ-4 に各週の葉柄長を示す。第3葉に注目すると、高温区では5週目くらいまで100 mm程度に増加し、その後漸減し80 mmを下回った。値が減じるのは、2週に1回くらいの頻度で新しい葉が展開するため、新しく第3葉となった葉がそれまでのものより小さかったことを示す。促成栽培は休眠を利用したもので、試験区によらず減少が基本的なトレンドとなる。高温区では、1週目から花が発生し、6週目からは収穫が始まっていたので、花や果実への光合成産物の分配が大きくなったことに起因する生育抑制がさらに加わったと考えられ、一般的な促成栽培でよく見られる状態であった。

一方低温区では、観察直後から生育抑制状態であり、観察終了間際まで果実の肥大成長が進まなかったため、この抑制は主に低温に起因すると考えられる。第5週目くらいからは60 mm程で推移した。この時期、低温区は露地栽培と同様に矮化しており、新葉の発生もほとんど無かったので、第3葉の更新も無く、多くの株で同一葉柄を計測することとなった。15週目以降からは増加に転じ、生育抑制が弱まったと考えられた。休眠には、植物体自身の生理状態による自発的休眠と気温等に起因する強制休眠があることが知られている（植松，1998）。5週目以降の停滞と15週目からの増加は、自発的休眠から強制休眠に移行し、気温の上昇に伴って強制休眠の状態から脱した様子を表したものと考えられた。

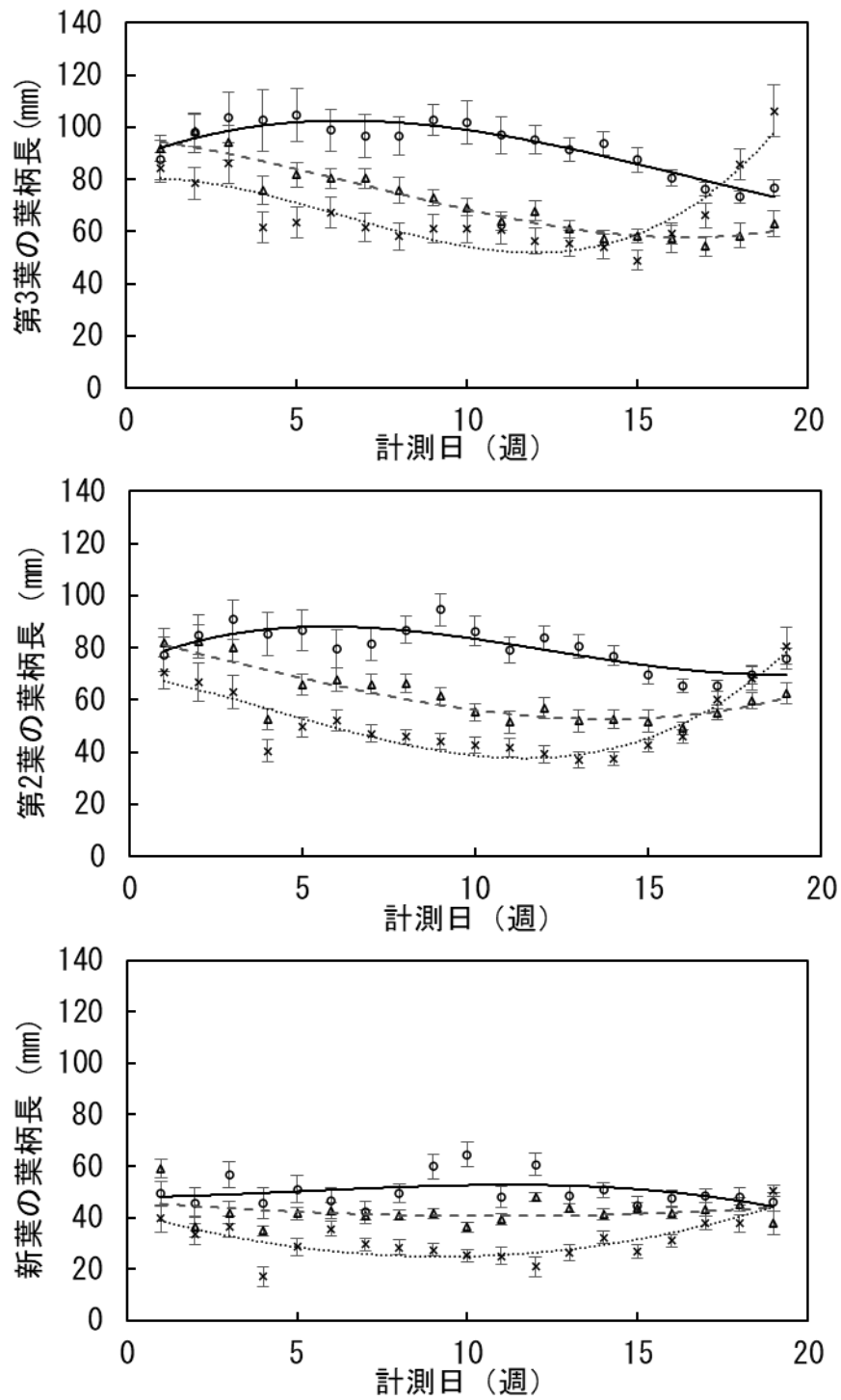
これらに対して中温区は、観察直後から低温区同様抑制状態であった。しかし、5週目を過ぎても生育が停止することは無く、15週目からの急激な増加も見られなかった。中温区と低温区で観察された第3葉柄長の長さの違いや、各々の長さの時間変化の違いが、両試験区間の休眠の深さの違いの指標になり得ると考えられた。一方、中温区と高温区との差は5週目には20 mmを超え、15週目くらいまで30 mm程度で推移した。これは、促成栽培での生育抑制状態を評価する指標として用いられるに値する明確な差違であり、第3葉の葉柄長を指標として用いることの有効性を示すことができた。また、葉柄の長さという一次的な即時データだけで状況判断に使える利便性は大きい。

今回、高温区と中温区の平均気温の差は数℃程度であるにも関わらず、大きな生育差が観察された。この程度の気温差はハウス内では容易に起こりえることで、改めて個体別の生育計測の必要性が明らかになった。また、この生育差は休眠の深さの違いによると考えられ、栽培管理によって休眠をコントロールすることでより良い生育を担保するという観点では、中温区は高温区と比較して休眠が深すぎたと言える。

ここで、生育抑制の開始と終了を推定するために近似曲線を導入する。イチゴの促成栽培における休眠は、自然環境における短日条件と低温条件によって深まった後、保温することで一時的に浅くなる方向へ推移する。その後、深くなる方向へ推移し、再び浅くなる方へ推移すると推定されている（植松，1998）。着果負担を別途考慮するとさらに良いが、ここでは生育抑制の開始と終了が生育量として現れると仮定して 3 次曲線を用い、その極値を取る時間軸を比較に用いた。ただし、観察開始前に既に抑制が起きていると推測される場合、終了と仮定している凹の極値の後に開始と仮定している凸の極値が出現することがあるので、その状況では 2 次曲線で生育抑制終了だけを推定した。

これにより、高温区では抑制開始が 6 週目、終了は計測範囲外（27 週目）、中温区では開始が計測範囲外（-3 週目）、終了が 16 週目、低温区では開始が 1 週目、終了が 12 週目と推定された。これらに対し、第 2 葉では高温区の開始は 6 週目と同様であったが、終了は 19 週目となった。中温区も終了は 14 週目となり、第 3 葉よりも早まった。このことは、生育抑制に伴う形態的变化を第 2 葉でより早く捉えられたことを示している。生育抑制の進行速度の大小や、生育抑制状態から覚醒しているか否かをより早く把握することで、生産者は、例えば気温や日長等の休眠に影響を与える環境条件の調節をより早く実行することができ、より目標に近い生育状態を実現できる。また、環境調節時には、温室ごとの環境制御機器の設置状況に応じてできる限り局所的に調節することで、温室内に発生する、株や一定範囲の群落ごとに生じる生育のばらつきを小さくすることができる。

一方、新葉は実験区間の差違が小さく、高、中温区では第 2、3 葉で見られたような生育抑制の傾向は明確で無く、毎週の変動も大きく、指標として用いるのは難しいことが分かった。これは、新葉は 2 週間に 1 回は更新しており、生育も旺盛なためで、例えば更新直後に計測タイミングが来てしまうと、大きく数値が減ってしまうことになる。このため、新葉を指標に用いるためには、この変動を小さくする工夫が必要であると考えられた。



○ — : 高温区, △ --- 中温区, × ... 低温区

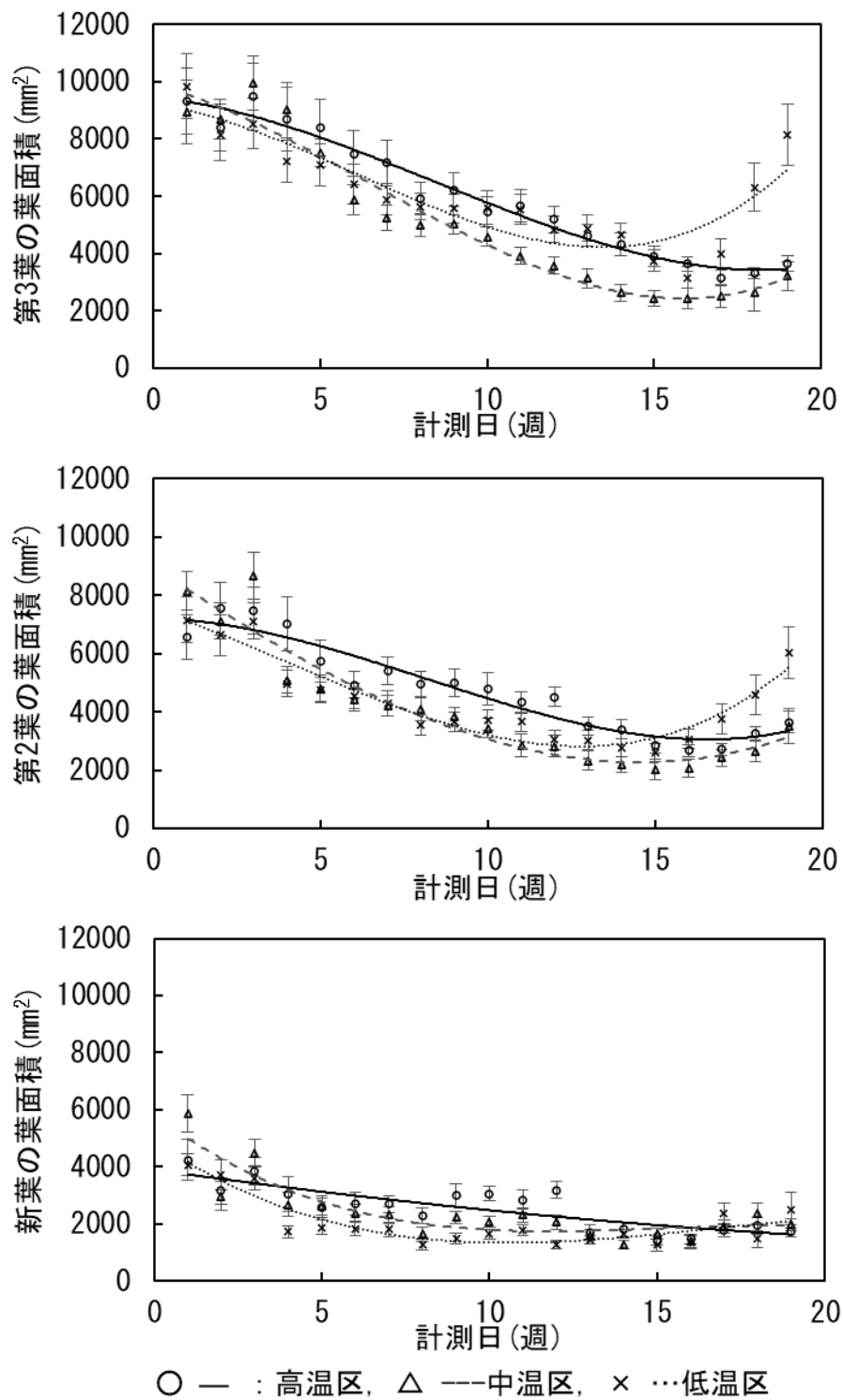
\*n=22 株, エラーバーは標準偏差を表す。

図Ⅱ-4 新葉から第3葉の葉柄長の経時変化

#### (4) 葉面積

図Ⅱ-5 に各週の葉面積を示す。概ね葉柄長と同様の変化傾向となり、第3葉では低温区が15週目で急激に増加し、高温区と中温区との間には最大1.5倍の差違があり、指標として用いることができると考えられた。

生育抑制の開始と終了では、第3葉の高温区では抑制開始が計測範囲外(-1週目)、終了は19週目、中温区では開始が計測範囲外(-3週目)、終了が16週目、低温区も開始は計測範囲外(-1週目)、終了が14週目と推定された。第2葉では、抑制終了が高温区で16週目、中温区で14週目となり、葉柄長と同様生育抑制に伴う形態的变化をより早く捉えることができた。新葉は葉柄長と同様で、差違が小さく、傾向も見いだせず、指標として用いるのは難しかった。

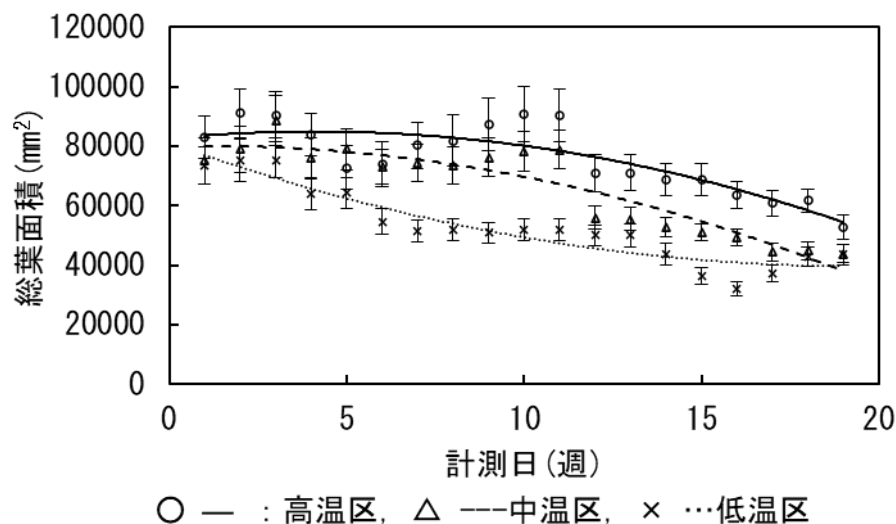


\*n=22 株, エラーバーは標準偏差を表す。

図Ⅱ-5 新葉から第3葉の葉面積の経時変化

### (5) 総葉面積

総葉面積は一般的な植物では、重要な生育指標である。しかし、イチゴでは葉が重なり合って群落を形成するため、栽培現場での目視による適切な評価や画像計測による省力的な定量評価が難しい。また、黄化した葉は随時取り除き、外側に広がり倒れた古い葉は、栽培管理上病害虫を防ぐためや、着果に光が当たりやすくして果実の成熟を促すために取り除く場合がある。葉が黄化する頻度は株ごとにばらつきがあり、摘葉の基準も生産者によって異なるため、指標としては利用しづらい。図Ⅱ-6に示すように高、中温区では11週目に、低温区では13週目から16週目にかけて大量に摘葉したことで、数値が大きく変化した。低温区はこの時期に強制休眠が終了したと考えられたので、古く朽ちた葉を強めに摘葉した。ただし、全体として生育抑制傾向であること、高温区と中温区の差が徐々に大きくなったこと、低温区は6週目以降生育変化がほとんど無いなど、全体としての傾向を読み解くことは可能であった。

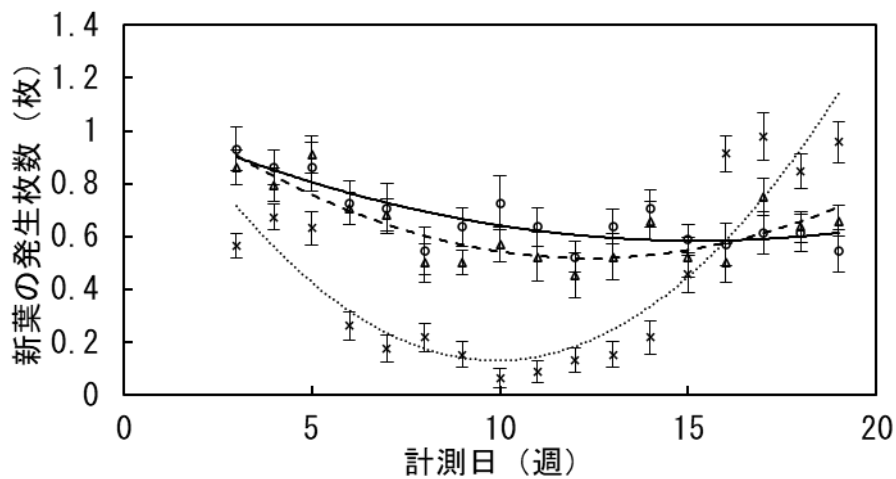


\*n=22 株，エラーバーは標準偏差を表す。

図Ⅱ-6 株ごとの総葉面積の推移

(6) 新葉発生頻度

図Ⅱ-7 に新葉の発生頻度を示す。概ね2週に1回くらいの頻度で発生し、今回は株毎の発生する週が偏ってしまったので、週変動が発生した。そこで、図には2週間分を移動平均した値を採用した。低温区では5週目以降に0.2程度すなわち、5週に1枚程度の発生となり、15週目以降に回復した。これは生育抑制状態をよく表しており、形態的变化を最も早く捉えることの出来る指標として期待できる。高、中温区間の差は小さいので、数値そのものは指標として用いるのは難しいが、極値から抑制終了を推定すると、高温区は16週目、中温区は12週目となり、第2葉の葉面積よりもさらに早くなった。



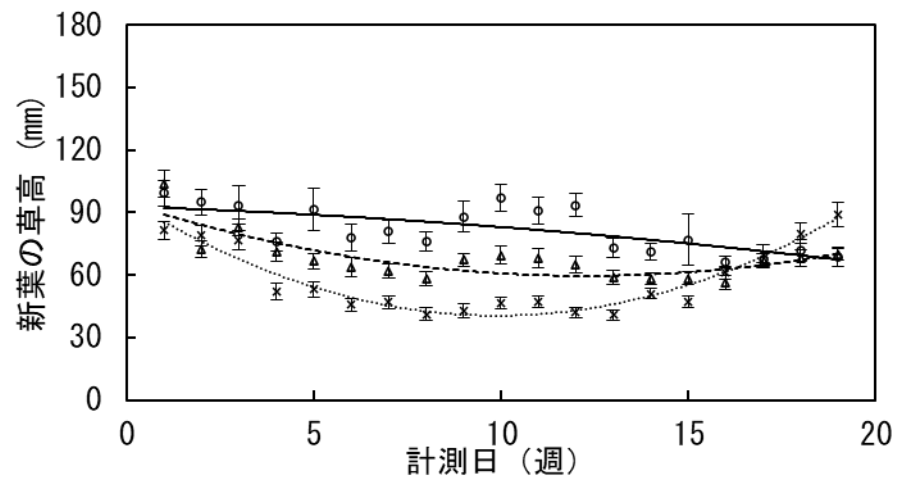
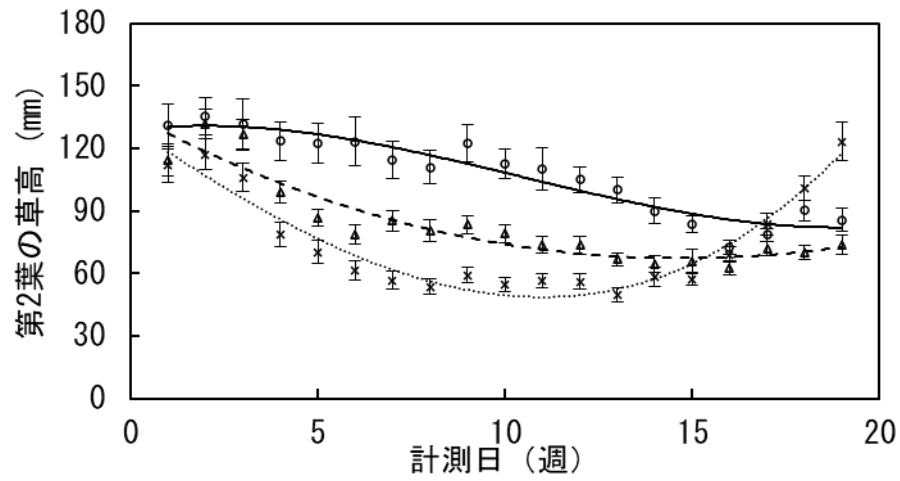
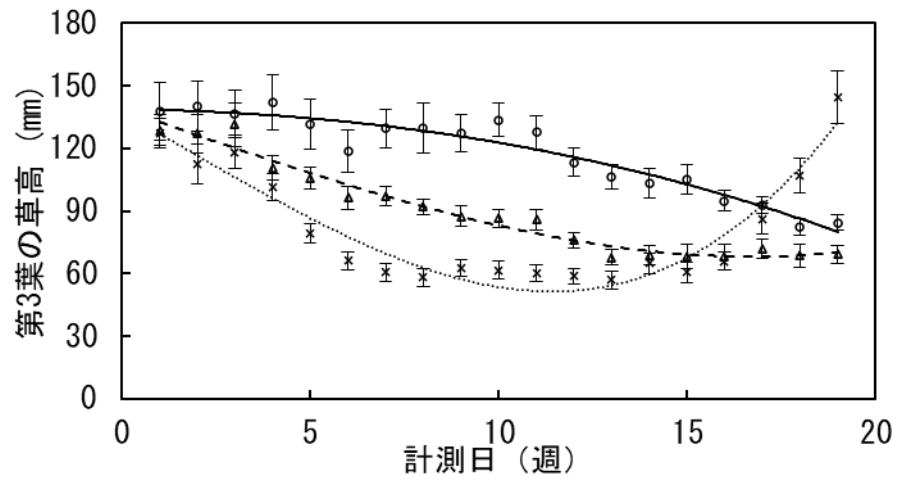
○ — : 高温区, △ --- 中温区, × ... 低温区

\*n=22 株, エラーバーは標準偏差を表す。

図Ⅱ-7 新葉の発生枚数の推移

#### (7) 草高

図Ⅱ-8 に草高の経時変化を示す。草高は葉柄長を要素に含むため、似たような変化を示し、低温区が自発的休眠から強制休眠に移行し、気温の上昇に伴って強制休眠の状態から脱した様子などをよく表した。中温区の第 3 葉で生育抑制の終了が 17 週目、第 2 葉で 15 週目であり、第 2 葉の方が早く生育抑制の影響が表れることも同様であった。異なる点としては、新葉も第 3 葉や第 2 葉と同様に生育抑制の傾向を見ることができた点である。草高には、葉柄長に加えて、葉の長さや、葉柄と主茎の成す角度が関わっており、今回はこれら複合的な要素により、新葉の高温区と中温区の差違も捉えることができたと考えられる。これにより中温区の生育抑制の終了が 12 週目と、新葉発生頻度と同様に早く見積もられた。



○ — : 高温区, △ --- 中温区, × ... 低温区

\*n=22 株, エラーバーは標準偏差を表す。

図 II-8 新葉から第 3 葉の草高の経時変化

#### 4. まとめ

現在指標として用いられている第3葉の葉柄長は、生育抑制の変化を形態変化としてよく表していたが、第2葉の方がより早期に形態変化として表れることが明らかとなった。また、標準的な各週での数値を明らかにしておき、その数値からの差違を測ることで状態を推測する可能性も考えられるが、経時的なデータを用いることで株ごとの生育抑制の状態変化の差異を捉えやすいと考えられた。この傾向は葉面積でも同様であった。

一方で新葉の葉柄長及び葉面積は、変動が激しく、指標としては使えなかった。その変動要因の一つである新葉の発生頻度に注目すると、週変動に注意する必要があるが、生育抑制状態を良く表現していた。実際の運用では、個体毎に新葉発生の時間間隔を取れば良いので、この週変動は容易に解決できると考えられた。葉面積や葉柄長も、高頻度な計測によって時間間隔と生長量の関係を計測できれば、第2葉よりも早期に生育抑制の状態を形態変化として捉えられる可能性が考えられた。

また、草高では葉柄長と同様に、第3, 2葉が生育抑制を良く表現していたが、葉柄とは異なり、新葉も指標として使える可能性があった。

ハウス内で容易に差が生じる数℃程度の生育温度差で生育抑制状態に差が生まれ、その状態差の推測に各生体情報の経時的な計測が有効であることから、検討した指標が生産現場で活用されるには、定期的な画像撮影を基にした自動計測等、省力的な計測手法が必要と考えられる。

### III 若葉観測に利用可能な気流条件

#### 1. はじめに

第Ⅱ章では、促成栽培イチゴにおける、低温期の生育抑制を評価するには、第2葉や新葉といった若葉を対象とすることが有効であり、より多くの株を経時的に観測することの重要性を述べた。しかしながら、イチゴの若葉は、生長した古い葉が死角になるため、画像観測のためには死角から若葉を露出させる工夫が必要となる。

イチゴの若葉に限らず、通常の一視野からの画像観測には死角が発生するという問題がある。このため、収穫ロボット開発を目的に、対象の下側から風を当ててトマト等果実を隠す葉を除ける方法（山崎，1996）や、果樹を揺動して枝葉を動かすことで隠れた果実を撮影する方法が提案された（藤田，2014）。また、複数方向から撮影することで収穫対象果実の露出具合を向上させる研究が行われた（Hayashi et al., 2017）。さらに、稲を対象に上方から加えた気流によって葉の側面画像や株元の雑草をモニタリングする方法が提案された（Yanagishita, 2018）。

イチゴの葉は、1本の葉柄と、その先端で展開する3枚の小葉からなる葉身で構成され、クラウンと呼ばれる地際の短く太い茎と接合している。新しい葉は古い葉の内側のクラウンの中心（生長点）から順次発生し、古い葉は徐々に株の中心から外側の方へ押し出されるため、葉はクラウンを中心に螺旋階段状の配置となる（柳，2012）。本章では、このようなイチゴの形態特徴に着目し、株の中心付近に上方から気流を加えて、葉をクラウンから見て外側へ押し広げることで、株の内側を露出させることを考えた。

しかし、植物体に気流を加えた場合、その物理力による損傷の発生が懸念される。特にイチゴは葉柄に対して葉身が大きいいため、茎が蔓状で複葉のトマトや笹状の葉を持つ稲と比較して損傷が生じる可能性が高いと想定される。このため、イチゴの若葉のモニタリングには、植物体を損傷させない気流の条件範囲を求めることが必須となり、作用させる気流から植物体を受ける荷重、及び植物体が損傷する荷重を明らかにする必要がある。

これまでに、植物体を受ける荷重に関連して、損失を抑えた穀粒の気流選別を目指し、粳、藁、ソバ等の抗力係数や揚力係数が明らかにされた（Matsui et al., 2004；古野ら，2006；上加ら，2019）。両係数は、物体の動きに伴う投影面積（以下、受圧面積）によって変化した。また、生育中の植物体を受ける荷重として、

防風林の効果を明らかにする目的で異なる風速下での測定が行われた (Mayhead, 1973 ; 石川, 2005)。樹木が風によってしなることで受圧面積が減少することから、風速が大きくなると抗力係数が低下することが示された。また、例えばサザンカでは抗力係数が 0.4, ナツツバキでは 0.66 といったように、しなりやすい樹種で抗力係数が低いことが示された (神山ら, 2004)。このように、収穫物や生体に対する検討が一部でみられるものの、イチゴの茎葉のように柔らかく変形が大きな生体を受ける風速と荷重の関係は調べられていない。

植物体の損傷については、収穫や選別の機械化のために果実のハンドリング強度を設計する目的で多数の報告がある。例えばモモで 30 kPa, ナシやリンゴには 45 kPa の圧力であれば損傷を与えずに果実を吸引できることが明らかにされた (石井ら, 2003)。一方、果実以外では例が少ないが、ウリ科苗の接ぎ木を機械化するために、茎を把持するときの圧縮歪と損傷の関係が調べられた (鈴木ら, 1995)。また、植物体の物理特性にまで視野を広げると、主に水分状態を評価するためにバラの茎の曲げ剛性 (川上ら, 2010) やウンシュウミカンの葉のヤング率 (中山ら, 2016) について報告されている。

このように、植物体や収穫物が損傷を生じる条件や物理特性は作目ごとに異なり、また使用目的に応じて様々な指標が調べられているが、イチゴの葉について調べられた報告は見られない。

このような背景の下、本章では、イチゴの株の上方から気流を加えて葉を押し広げるのに利用可能と考えられる風速範囲を検討するために、気流により葉身が受ける荷重、及び葉身が受けた荷重によって葉柄が損傷する条件を明らかにした。

## 2. 材料及び方法

### (1) 葉が受ける気流と荷重の関係

流体から物体が受ける力を抗力とすると、一般に以下の式 (1), (2) のように風速の 2 乗及び物体の流れに垂直な受圧面積に比例し、これらに物体の形状などによる固有な抗力係数を乗じることで計算することができる。

$$\rho = \frac{P}{RK} \quad (1)$$

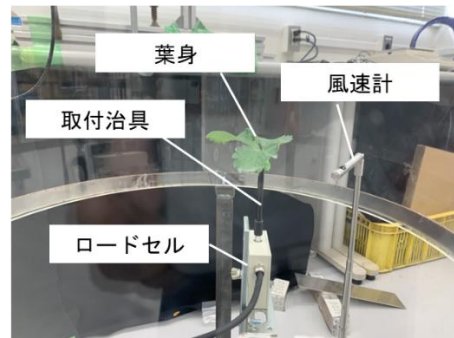
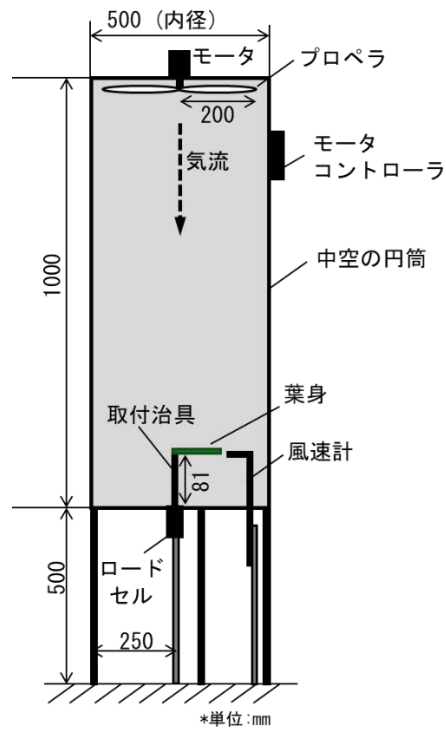
$$D = \frac{\rho}{2} v^2 A C_d \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) は流体の密度、 $P$  (hPa) は気圧、 $R$  は気体定数及び  $K$  (K) は気温を表す。 $D$  (N) は抗力、 $v$  (m/s) は流速、 $A$  (m<sup>2</sup>) は物体の流れに垂直な受圧面積、 $C_d$  は抗力係数を表す。

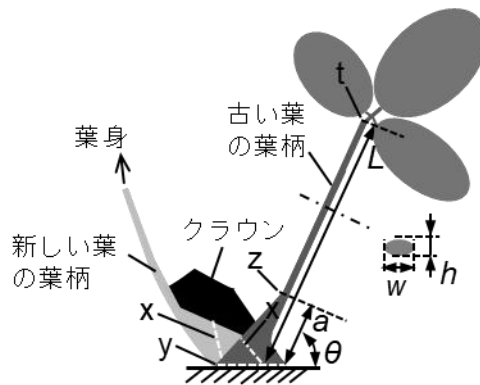
本研究ではこの抗力を風荷重、流速を風速、物体を葉身として、上方から気流を受けたときに加わる風荷重を実測して葉身の抗力係数を求め、風速と風荷重の関係式を導出した。

イチゴの葉は、葉柄と葉柄の先端にある 3 枚の小葉からなる葉身で構成される。その葉身を 12 株から供試し、葉の生長や老化の過程によって受ける風荷重の差違を調べる目的で、株の中で最も新しい葉から第 6 葉までの葉身が受ける風荷重について調べた。各々の葉身の物理的特徴は、葉面積、厚さ、フェレ径比 (葉幅／葉長)、密度 (質量／(葉面積×厚さ)) を測定した。葉面積は風荷重を実測したあと、複写機によってスキャンし、葉の領域を画像処理ソフト (MVTec 社製, HALCON) によって測定した。厚さは定圧ノギス (ミットヨ社製, NTD2520CX) によって測定し、葉脈を外した小葉の中央付近の 2 カ所の平均値とした。

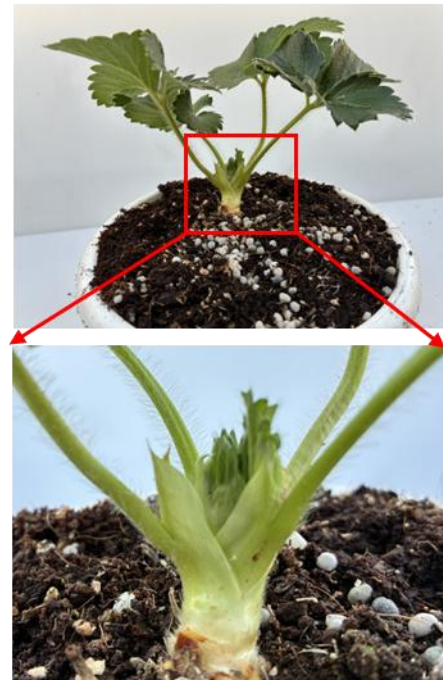
図Ⅲ-1 に実験に用いた送風装置と気流が加わったときの葉の荷重測定の概要図を示す。送風装置は、アクリル製の中空パイプ (内径 500 mm, 長さ 1 m) の上端に、パイプの中心に軸を合わせて回転数 10,000 rpm 程度まで制御可能なブラシレス DC モータ (エムリンク社製, CPH50) を設置し、モータ軸に長さ 200 mm の羽根 2 枚からなるプロペラを取り付けた構造とした。パイプの下方にはパイプ径と同じ 500 mm の空間を設けて、パイプ内で上方から下方に流れる気流ができる限り整流となるようにした。実際の栽培状態では植物の下に培地があるので、流れは複雑に変化するが、今回は整流下での基本的な測定を行った。



図Ⅲ-1 送風装置及び荷重測定実験の概要



$L$  : 葉柄長,  
 $\theta$  : 葉柄角度  
 $w$  and  $h$  : 葉柄の幅と厚さ  
 $a$  : 株元長 (yからzの距離)  
 $x$  : 亀裂面  
 $y$  : クラウンとの連結部  
 $z$  : 葉柄の形状が変わり始める部分  
 $t$  : 葉身が葉柄に接続する部分



図Ⅲ-2 イチゴ株のイメージ図と部位の定義

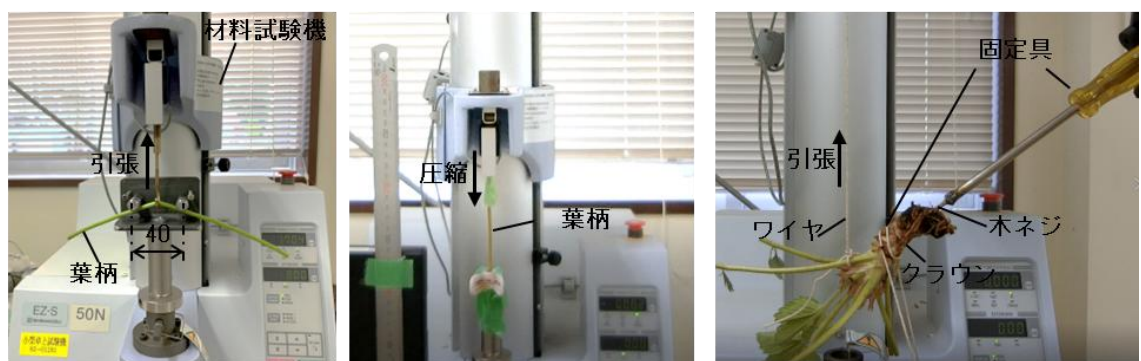
ここで、図Ⅲ-2 にイチゴの株の形状についてのイメージ図を示す。荷重測定は、地上高 500 mm のパイプ中心にロードセル（IMADA 社製，eDPU-5N）を設置し，3 枚の小葉がおおよそ水平になるよう葉身の付け根部分（小葉柄，図Ⅲ-2 の t）を固定して行った。風速は，葉身に接触しないできる限り近くの位置に風速計（ARIA TECHICA 社製，AF101）を設置して測定した。

風速は 0～7 m/s で 9～14 段階として，各条件において 20 秒間連続して気流を加え，その間，風速と加わった荷重を各々の計測器のデータログによって毎秒記録し，平均した。なお，風速 1 m/s 未満の低速域においては葉に加わる荷重が小さいため，計測器の分解能（ $10^{-3}$  N）では計測不能な場合があり，連続計測した 20 秒間で記録した荷重値が半数以上 0 である場合，そのデータは除外した。

## (2) 葉柄の損傷について

### a. 葉柄の形状

葉柄は下端部分（図Ⅲ-2 の y）でクラウンと接合していて，図Ⅲ-2 の y から z までの間は，それより上側で棒状なのに対して膜形状に近く，投影すると扇形である。その扇形部分が，クラウンを包み込むような構造となっている。イチゴの株に上方から気流を加えた場合，3 枚の小葉に風圧が加わり，小葉柄（図Ⅲ-2 の t）の荷重として集約される。この荷重は葉柄と風の成す角度に応じて，葉柄の厚さ方向及び長さ方向に分力されるので，それぞれの分力で損傷する荷重を測定した。いずれの実験にも新葉から第 6 葉までを供試し，島津製作所社製の材料試験機（EZ-S）を用いて変位量と荷重の関係を調べた。



a) 曲げ荷重

b) 座屈

c) 株元からの剥離

図Ⅲ-3 材料試験による葉柄の強度調査の様子

b. 曲げ荷重による損傷

厚さ方向の分力は、先端荷重の片持ち梁の形で、葉柄をたわませるように作用するとした。固定端は、実際の観察でも折れ曲りが多く観察された、葉柄の形状が変わる図Ⅲ-2のzとした。曲げ応力の測定は、図Ⅲ-3-a)に示すように両端支持中央荷重の引張試験で、変位量と荷重の関係を調べて行った。曲げ応力の算出には、以下の式(3)から(5)を用い、断面は楕円とした。

$$M = \frac{PL_{test}}{4} \quad (3)$$

$$Z = \frac{\pi wh^2}{32} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (5)$$

ここで  $M$  (Nmm) は曲げモーメント、 $P$  (N) は損傷荷重、 $L_{test}$  (mm) は葉柄の支持長さである。 $Z$  (mm<sup>3</sup>) は断面係数及び  $\sigma$  (MPa) は曲げ応力、 $w$  (mm) と  $h$  (mm) は葉柄の幅と厚さを表す。

供試した葉柄は12株から採取した72本で、幅が平均3.4 mm、標準偏差0.8 mm、厚さが平均3.1 mm、標準偏差0.6 mmであった。支持長さは40 mmで、材料試験機が葉柄をたわませるように上方へストロークする速度(引張速度)を0.17 mm/sとした。

c. 座屈による損傷

葉柄は長柱のように細長いため、長さ方向への分力は、座屈により葉柄をたわませるように作用するとした。座屈荷重の測定は、図Ⅲ-3-b)のように一端固定他端回転支持の長柱に負荷が加わった場合として行い、ヤング率は式(6)から(8)のオイラーの公式で算出した。

$$I = \frac{\pi wh^3}{64} \quad (6)$$

$$L_k = \alpha L_d \quad (7)$$

$$E = \frac{L_k^2 P_{cr}}{\pi^2 I} \quad (8)$$

ここで、 $I$  (mm<sup>4</sup>) は葉柄の断面 2 次モーメント、 $L_k$  (mm) は座屈長さ、 $L_d$  (mm) は供試した葉柄の長さ、 $\alpha$  は支持条件であり、一端固定他端回転支持で実験したため 0.7 を用いた (岡島, 1980)。実際の座屈荷重の試算においては、葉柄が片持ち支持であることから、支持条件を 2.0 とした。 $E$  (MPa) はヤング率、 $P_{cr}$  (N) は座屈荷重を表す。

供試した葉柄は 20 株から採取した 120 本で、曲がりが少ない部分を選択して切り出した供試葉柄長は平均 58.6 mm、標準偏差 11.7 mm であった。葉柄の幅と厚さは平均 3.4 mm と 2.9 mm、標準偏差 0.42 mm と 0.36 mm であった。上端は直径 5 mm、深さ 3 mm の中空の筒内に挿入して支持し、上方から 0.19 mm/s で圧縮した。

#### d. 株元からの剥離

葉柄は株元の基部で扇形となり、下端の y 面 (図Ⅲ-2) で接合している。この扇形面は構造的に接合しているわけではなく圧着されている様な状態なので、剥離しても養水分の移動などには影響は無いと考えられる。これは、古い葉になるにしたがって剥離が進み、葉が徐々に倒れていくが、枯れることなく生育を維持していることから明らかである。しかし、剥離によって葉柄が倒れると株の受光態勢に影響を与える。外力への抗力にはクラウンと接合している y 面の構造も関係すると考えられるが、別々に測定することは難しいので、図Ⅲ-3-c) のようにクラウンを木ねじで固定し、y 面から先端方向に平均 16 mm、標準偏差 4.2 mm の位置に取り付けたワイヤを葉柄基部に垂直方向に引いて損傷荷重を調べることとし、その曲げモーメント (Nmm) を求めた。なお、新葉は扇形面がクラウンから露出しきっていないため測定対象から外した。

供試した葉柄は 11 株から採取した 66 本で、引張速度は 0.18 mm/s とした。

#### (3) 利用可能な風速範囲の検討

気流により葉が動揺する状況で葉柄に損傷が生じたかどうかを判断することは困難である。損傷は、外観形状の明確な変化が起こる前に生じているため、その判断には移動量と荷重の関係の微小な変化をとらえる必要があるが、葉が動揺する状況でその変化を測定できる実験系を構築することが難しいためである。そこで、風洞実験による風荷重の測定と、静的な状態での材料試験の結果を組み合わせることで、若葉を観測するために株に上方から気流を加えるこ

とが可能な風速範囲を検討する。すなわち、気流によって葉柄が損傷するリスクを負わない風速について考察するため、葉柄に加わる荷重が最も高くなる状態を想定した。具体的には、曲げや株元の損傷では、上方から気流を受けた葉が、株の中心から見て外側に倒れ、葉柄が培地面と水平になった状態で最も大きな荷重を受けるので、葉柄角度は $0^{\circ}$ とした。また、座屈では、葉柄が培地面と垂直な状態を維持したときが最大となるので、葉柄角度は $90^{\circ}$ として試算した。

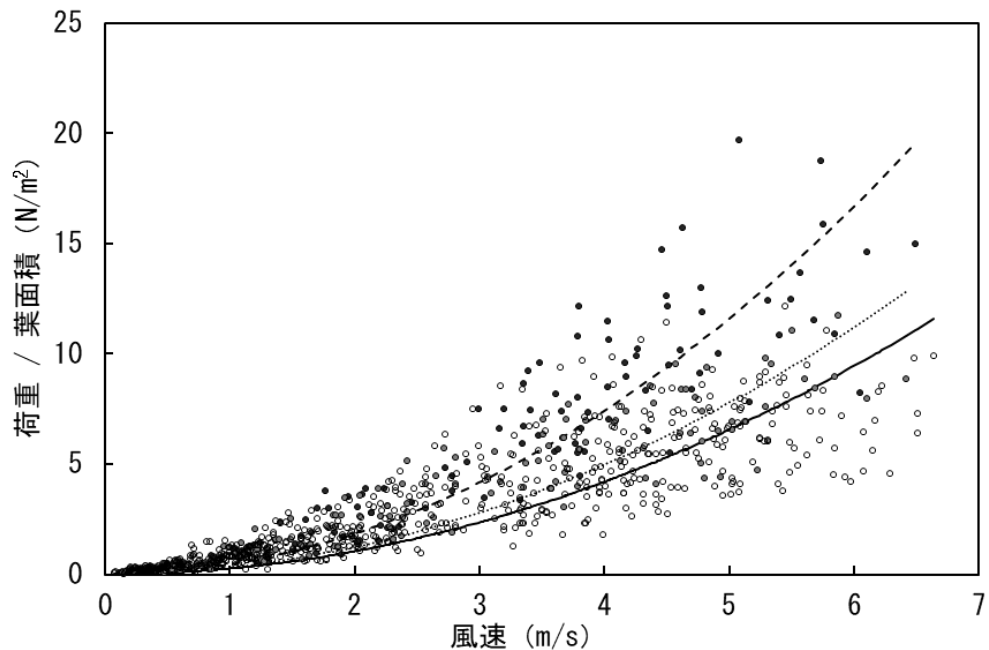
実験に用いたイチゴは、2020年9月23日にちどり植え株間20 cmで定植し、11月中旬に10株を対象に新葉から第6葉までの各々に対し、培地面からの最大高、葉柄長（図Ⅲ-2の $L$ ）、株元長（図Ⅲ-2の $a$ ）、葉面積、葉柄角度（図2の $\theta$ ）、葉柄の幅と厚さ（図Ⅲ-2の $w$ と $h$ ）を計測した。最大高は直尺、葉柄長及び株元長 $a$ はテープメジャ、葉柄角度はデジタル角度計（Wixey社製、WR300）、葉柄の幅と厚さは定圧ノギスを用いて計測した。また、葉面積は、第Ⅱ章と同じく、デジタルカメラ（CASIO社製、EX-ZR1800）で30 cmの距離から撮影し、画像処理ソフトによって計測した。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 葉が受ける気流と荷重の関係

気流と荷重の関係を求めるために用いた葉身の物理的特徴は、生長過程にある新葉の葉面積が他の半分程度で、密度が  $1.08 \text{ g/cm}^3$  と他より 1 割ほど高かった。また、厚さは葉ごとに評価できるよう葉面積で除して、単位面積当たりとしたところ、新葉は他の 2 倍弱となった。第 2 葉以降の物理的特徴には有意な差違は無かった。

単位葉面積当たり荷重と風速との関係を図Ⅲ-4 に示す。葉位ごとに傾向が異なるようであったので、新葉、第 2 葉と第 3 葉以降の 3 つに分類したところ、新葉の方が風の影響を強く受けることが明らかになった。これは、新葉が、閉じた状態で出葉して、そこから開ききるまでは葉脈を谷とした V 字状の構造となることや、単位葉面積当たりの厚さも比較的大きな値であったため、変形しにくく風荷重が大きくなったと考えられた。第 3 葉以降では葉位が増えても同様の傾向となり、第 2 葉は中間的な値となった。



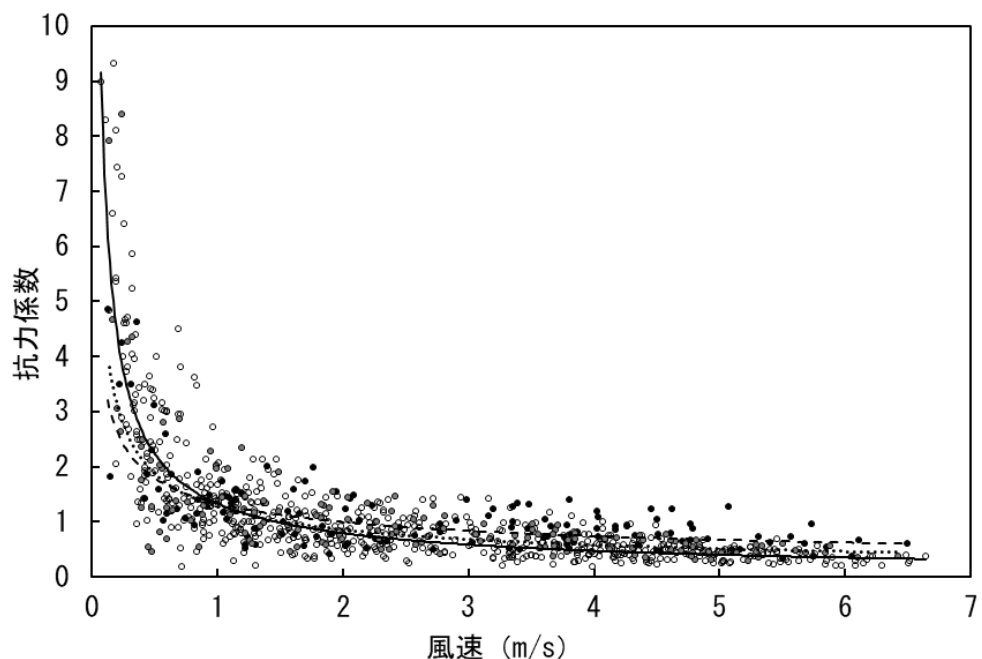
- , --- : 新葉 (n= 135),  $y = 0.46 x^2$ ,  $R^2 = 0.82$
- , ... : 第 2 葉 (n= 149),  $y = 0.31 x^2$ ,  $R^2 = 0.82$
- , — : 第 3~6 葉 (n= 596),  $y = 0.26 x^2$ ,  $R^2 = 0.70$

図Ⅲ-4 葉に加わる風速と葉面積当たりにかかる荷重の関係

式 (1) と (2) において、葉面積を受圧面積  $A$  ( $\text{m}^2$ ) とし、気温が  $20^\circ\text{C}$  であったため空気密度を  $1.2 \text{ kg/m}^3$  とし、抗力係数  $C_d$  を求めると、新葉で 0.77, 第 2 葉で 0.52, 第 3 葉以降で 0.46 となり, Tukey-kramer の HSD 検定で各々 5 %水準で有意な差があった。決定係数  $R^2$  は 0.70 から 0.82 で, 傾向を捉えるには十分であると考えられた。

しかし, 葉身は, 同じ風速の風を受けている間も不規則に揺れ動くことで刻一刻と変化するため, 式 (2) の受圧面積  $A$  は一定ではない。一方で, 刻一刻と変化する受圧面積は実測することが難しい。このため, 受圧面積は葉面積 ( $A_l$ ) で一定として, 面積変化の影響は抗力係数に含ませることとし, 式 (2) において, それぞれの葉の測定結果を代入して風速と抗力係数  $C_d$  の関係を求めた。

結果を図Ⅲ-5 に示す。抗力係数は風速増加に伴って漸減することが分かった。これは風速の増加に伴って葉が変形したり, 向きを変えたことが原因であると考えられた。この他に抗力係数に影響を与える要素として, 表面粗さと, レイノルズ数があるが, 葉は気流の影響を受けて不規則に向きを変えるため, 計算することが困難である。このため, 前者は一定, 後者は流れに垂直に置かれた平板と仮定して影響を受けないとした。



- , --- : 新葉 ( $n=135$ ),  $y = 1.34 x^{-0.43}$ ,  $R^2 = 0.50$ ,
- , ... : 第 2 葉 ( $n=149$ ),  $y = 1.27 x^{-0.56}$ ,  $R^2 = 0.63$
- , — : 第 3~6 葉 ( $n=596$ ),  $y = 1.33 x^{-0.75}$ ,  $R^2 = 0.73$

図Ⅲ-5 風速とイチゴ葉身の抗力係数の関係

これらの関係の近似曲線に，風速  $v$  の単純な関数として表現できるよう，累乗近似を用いた（式（9））。

$$C_d = mv^n \quad (9)$$

ここで  $m$  と  $n$  は係数で，表Ⅲ-1 に葉位別の値を示す。これにより，式（10）のように，上方から気流を受けた葉身が受ける風荷重を，静止時の受圧面積である葉面積（ $A_r$ ）と風速の関数として求められるようになった。

$$D = \frac{mA_r V^{n+2}}{2RK} \quad (10)$$

表Ⅲ-1 抗力係数と風速の関係式（式 9）における葉位別の係数

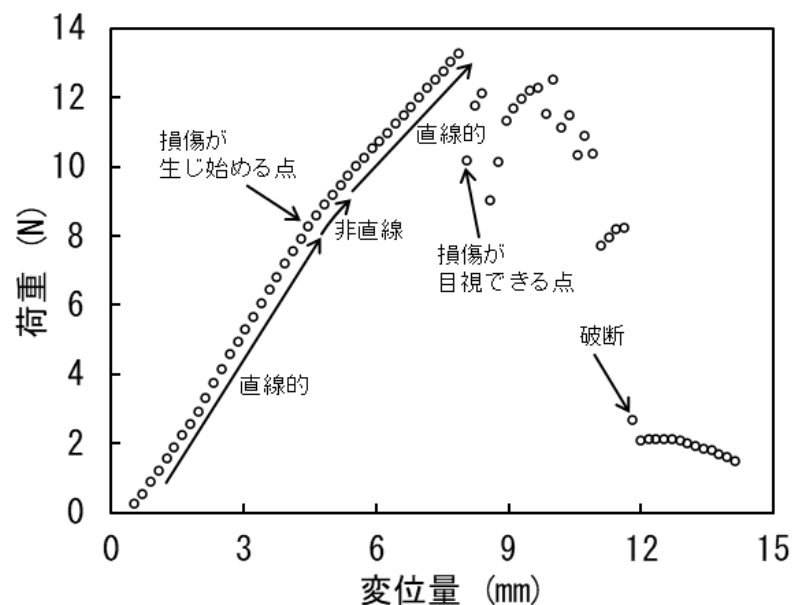
| 葉位          | m    | n     |
|-------------|------|-------|
| 新葉          | 1.34 | -0.43 |
| 第 2 葉       | 1.27 | -0.56 |
| 第 3 葉～第 6 葉 | 1.33 | -0.75 |

抗力係数を風速の関数とすることで，風荷重の予測精度は，決定係数 0.88 から 0.93 に向上した。

## (2) 葉柄の損傷について

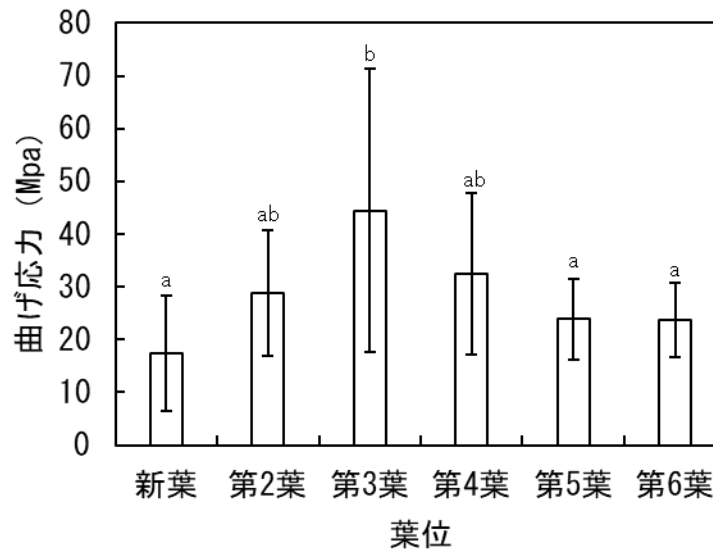
### a. 曲げ荷重による損傷

葉柄の両端支持中央荷重による引張試験の結果の一例を図Ⅲ-6 に示す。この図は、装置の振動等によると考えられるノイズを除去するため、0.05 秒おきに計測した変位量 0.0085 mm に対応した荷重の 3 点の移動平均を行い、図の視認性を良くするために変位量 0.18 mm おき、すなわち、計測データの 20 点おきにプロットしたものである。変位量 4.3 mm 付近まで線形で推移し、変位量 7.9 mm、荷重 13.3 N を超えたところで荷重が 10.2 N まで大きく低下した。このとき、葉柄表面の破断が目視確認された。さらに変位量を大きくすると、11.8 mm で葉柄内を通る輸送管がちぎれて葉柄が二つに分断された。一般的に、弾性限度を超えると材料に不可逆的な変化が生じて物質が壊れたと判断できるが、特に非鉄金属材料では比例限度との区別は難しい。今回は比例限度、この例では変位量 4.3 mm、荷重 7.9 N を超えると損傷が生じると判断することとした。



図Ⅲ-6 両端支持中央荷重の引張試験における葉柄の変位量と荷重の関係例

図Ⅲ-7 に葉位別に算出した曲げ応力を示す。曲げ応力は、新葉で 17 MPa であったものが、第 2 葉で 29 MPa、第 3 葉で 44 MPa と葉位が進むに従って上昇した。一方、第 4 葉は 33 MPa、第 5、6 葉では 24 MPa と低下していった。このことから、発生後第 3 葉までは成熟して強くなるが、生長が止まった後は組織の老化などにより、新葉と同程度まで弱くなることが分かった。このことは、外観や感触とも一致していた。



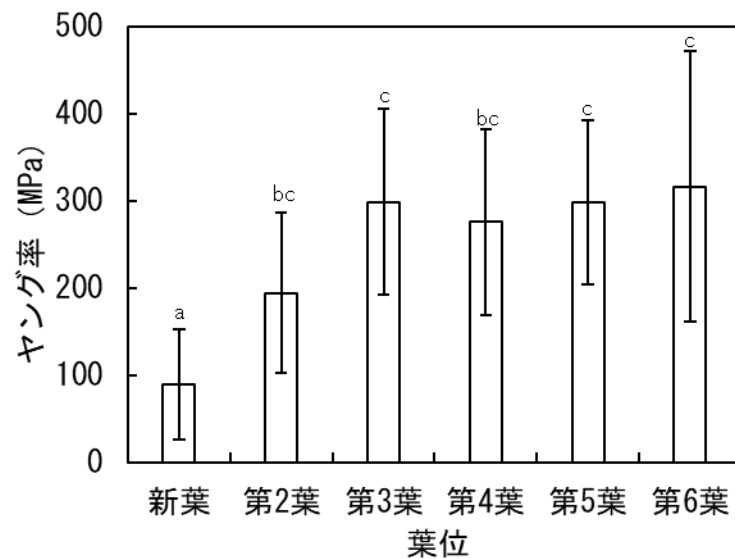
\*n=12, エラーバーは標準偏差を表す。異なる文字間で 5 %水準で有意差有。

図Ⅲ-7 葉位別の葉柄の曲げ応力

#### b. 座屈による損傷

座屈試験では、変位量と荷重が線形で推移した後、急激な荷重低下が認められた。実験中の観察でも、この時に葉柄は座屈したと判断できたので、変曲点を座屈荷重とした。座屈は、垂直応力が極限強さを超えるよりも小さな力で生じるため (町田, 1989), 葉柄の長さ方向に荷重が加わると、圧縮や引張による損傷ではなく、座屈によって損傷が生じると考えられた。

葉位ごとに算出したヤング率を図Ⅲ-8 に示す。ヤング率も、新葉が 89 MPa, 第 2 葉が 194 MPa, 第 3 葉が 298 MPa と葉位が進むに従って上昇した。第 4 葉以降は 276~316 MPa で第 3 葉と同様となった。このことから、生長過程にある新葉は柔らかく、座屈しやすいことが明らかになった。一方、曲げ荷重のときののような老化によると考えられる、葉位に伴う低下は見られなかった。生長の止まった葉柄の表面はしだいに硬化していくが、厚さ方向には折れやすくなる反面、長さ方向には頑丈な構造になると考えられた。



\*n=20, エラーバーは標準偏差を表す。異なる文字間で 5 %水準で有意差有。

図Ⅲ-8 葉位別の葉柄のヤング率

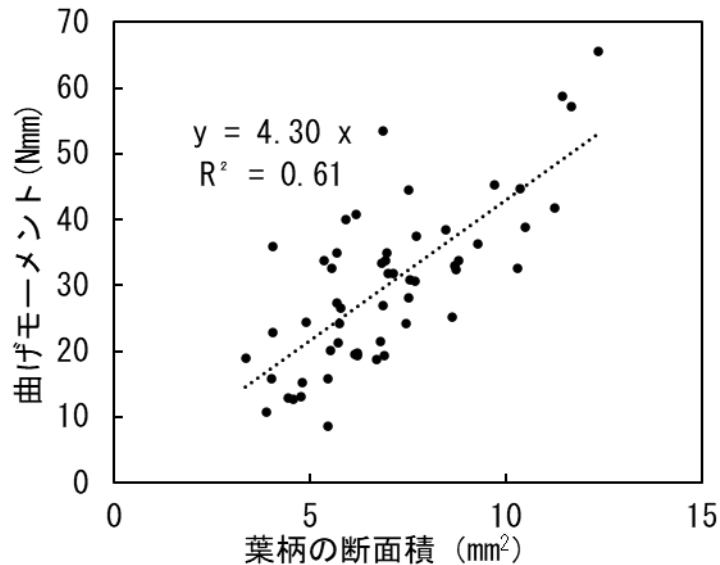
#### c. 株元からの剥離

株元では、変位量と荷重の関係が線形で推移した後、傾きが変化する変曲点があり、その後荷重の増加速度が低下した。この辺りで x 面 (図Ⅲ-2) での亀裂が認められた。さらに変位が進むと、亀裂部位が広がり扇形部位が破断して葉柄が剥離した。初めに生じた x 面の亀裂部位は、生長して古くなった葉にも自然と生じるが枯れることなく生育を維持するため、葉柄内の養水分移動には関係していないと考えられるものの、葉柄下部を支える構造物なので、葉柄角度などの葉の立性を低下させる原因となる。立性が低下すると、葉同士の重なりが大きくなって受光量が低下することから、この亀裂は損傷として考慮すべき現象と考えられる。このため、最初の変曲点を株元の損傷荷重とした。

葉位別に算出した曲げモーメントには、曲げや座屈と異なり差異は無かった。また、曲げや座屈と違い、複雑な構造体での接着の剥離や引っ張り破断などの複合作用に明快な力学モデルを適応できなかったため、断面積との関係を実験式で求めた。断面積は、y 面での葉柄基部とクラウンとの境目の区別は難しかったので、z 面での葉柄部分のものとし、幅と厚さから楕円で近似した。図Ⅲ-9 に示すように断面積と損傷時の曲げモーメントの間に相関係数 0.78 の正の相関があり、断面積が大きくなるほど株元が損傷し難くなることが明らかになった (式 (11))。

$$M_t = 4.3A_d \quad (11)$$

ここで,  $M_t$  (Nmm) は株元が損傷する曲げモーメント, 4.3 は比例係数 (Nmm/mm<sup>2</sup>),  $A_d$  (mm<sup>2</sup>) は葉柄の断面積を表す。



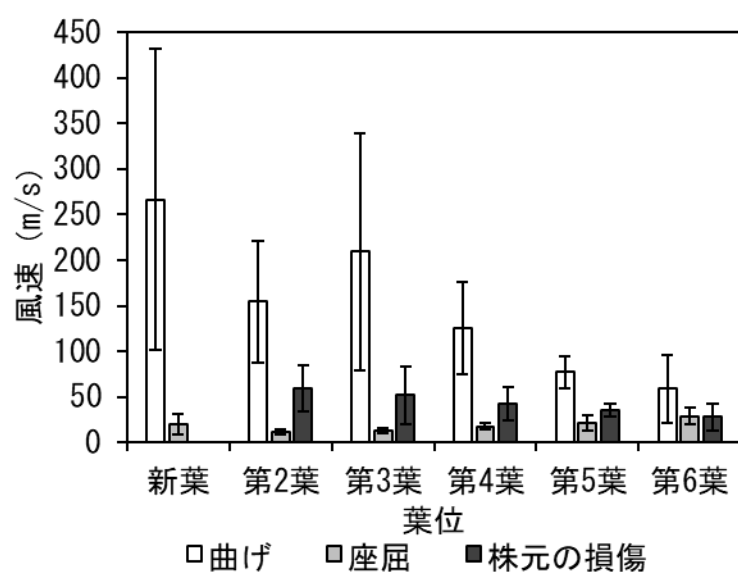
図Ⅲ-9 葉柄の断面積と株元が損傷する曲げモーメントの関係

### (3) 利用可能な風速範囲の検討

若葉の露出に利用可能な風速は, 小葉が接合する葉柄の先端 (図Ⅲ-2 の t) に, 気流による垂直荷重が加わり, 曲げや株元の損傷では葉柄の厚さ方向に, 座屈では葉柄の長さ方向に全ての風荷重がかかるとして計算した (図Ⅲ-10)。

計算には, 葉柄長, 株元長, 葉柄の幅と厚さ及び葉面積の実測値 (表Ⅲ-2) を用いたが, このときの実測値は, とちおとめの栽培指針 (栃木県農業試験場, 2001) における 11 月の葉面積及び葉柄長に近かったことから, 一般的な生育状態といえた。また, 11 月は休眠の程度が深まる時期であり, 収穫日や収量を予測し, それらを調整するための環境制御や栽培管理にとって重要な時期である。

全ての計算結果は, 風荷重を測定するための実験条件であった, 風速 0~7 m/s の範囲では損傷は生じない値となった。しかしながら, 実際には風速 7 m/s 以上になることも考慮して, 若葉の観測時に加えることができる風速範囲を検討する際の参考データとして考察を行った。



\*n=10, エラーバーは標準偏差を表す。

図III-10 葉に損傷を生じる風速の試算例

表III-2 具体的なイチゴ株の形状例 (促成栽培, 11月)

$n = 10$

| 葉位  | 葉面積                 | 草高           | 葉柄長             | 葉柄の幅            | 葉柄の厚さ           | 株元長             | 葉柄角度                |
|-----|---------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|
|     | $A_r (\text{mm}^2)$ | (mm)         | $L (\text{mm})$ | $h (\text{mm})$ | $w (\text{mm})$ | $a (\text{mm})$ | $\theta (^{\circ})$ |
| 新葉  | $3661 \pm 2509$     | $98 \pm 19$  | $67 \pm 18$     | $2.9 \pm 0.3$   | $3.4 \pm 0.2$   | $24 \pm 3$      | $82 \pm 3$          |
| 第2葉 | $11163 \pm 2619$    | $156 \pm 25$ | $112 \pm 13$    | $3.4 \pm 0.2$   | $3.7 \pm 0.2$   | $25 \pm 3$      | $80 \pm 5$          |
| 第3葉 | $14850 \pm 2821$    | $193 \pm 26$ | $137 \pm 12$    | $3.5 \pm 0.2$   | $4.0 \pm 0.1$   | $23 \pm 2$      | $75 \pm 8$          |
| 第4葉 | $15030 \pm 2491$    | $164 \pm 25$ | $126 \pm 18$    | $3.6 \pm 0.3$   | $4.0 \pm 0.2$   | $21 \pm 3$      | $66 \pm 11$         |
| 第5葉 | $13738 \pm 2320$    | $158 \pm 26$ | $123 \pm 11$    | $3.7 \pm 0.3$   | $3.9 \pm 0.3$   | $18 \pm 3$      | $64 \pm 9$          |
| 第6葉 | $14037 \pm 2666$    | $132 \pm 25$ | $108 \pm 12$    | $3.4 \pm 0.3$   | $3.8 \pm 0.3$   | $15 \pm 3$      | $49 \pm 10$         |

\*平均 ± 標準偏差

座屈は曲げや株元の損傷と比較して小さな風速で、例えば金属や材木のような一般的な材料と同様に、損傷が生じるリスクが高いと考えられた。葉位別では、第2葉が損傷する風速が低く、座屈によって損傷させるには平均風速 11 m/s が必要という試算結果を得た。第2葉は第3葉以降と比べて葉面積が小さかったが、ヤング率が低い影響が表れたためと考えられた。また、実際の株の条件においても、第2葉は第3葉以降と比べて葉柄角度が高いため、第2葉と第3葉以降の葉が風荷重に対して同じように傾斜するとすれば、第2葉の損傷リスクが高いと考えられた。一方で、新葉は第2葉よりもヤング率が低かったが、葉面積が 1/3 程度であり、葉身が受ける風荷重が小さいため、第2葉よりも風速が高

くなった。

曲げと株元の損傷では、株元を損傷させるのに必要な風速が小さく、20 m/s 程度であった。曲げと株元の損傷は、同じ方向の分力によって生じるため、気流の乱れがないと仮定すると、葉柄の軸部分ではなく、株元の損傷が生じやすいと考えられた。葉位別には明確な傾向は見られなかったが、これは、株元の損傷を生じる曲げモーメントが葉位によらなかったため、風速は、葉柄の幅と厚さ及び葉柄の長さに依存した。

観測に用いる風速設定には、損傷を生じるリスクが低い、より低い風速を基準にするべきであり、第2葉を座屈させるのに必要であった 11 m/s を超えない、風速 10 m/s 程度がしきい値と考えられた。

#### 4. まとめ

株上方からの気流で古い葉を押し広げて内側の若葉を観測することを目指し、気流から葉が受ける風荷重と、葉が損傷する荷重を明らかにした。

葉身が受ける風荷重を調べた結果、風速の2乗に比例して増加した。一方、受圧面積は風速の増加に対して漸減するので、これを包括させた抗力係数も、葉位に応じて減少した。新葉では受圧面積の変化が小さいため、同じ風速でも風荷重が大きかった。この抗力係数を風速の関数とすることで、風荷重は決定係数0.88～0.93の精度で推定可能となった。

葉柄の曲げ応力は第3葉、第2・4葉、新葉・第5・6葉の順で優位に高く、生長していく過程で強くなり、劣化とともに弱くなると考えられた。一方、葉柄のヤング率は、新葉が89 MPa、第2葉で194 MPa、第3葉以降で297 MPaと、葉位が高くなるほど座屈に対する強度が優位に高くなった。また、葉柄の株元への負荷で扇形部分に亀裂が入る曲げモーメントは、葉位によらず、葉柄の断面積と強い相関があることが明らかとなった。

実際のイチゴ株に気流を加えて、損傷を生じる風速を計測することは容易ではないが、本章で明らかにした、葉身の抗力係数の算出方法及び葉柄の損傷に関する物性値は、若葉観測のためにイチゴの葉を損傷させずに加えることができる風速を求めるための根拠となる。

本章では、「とちおとめ」の平均的な形状と、葉が受ける気流の風速と荷重の関係及び葉柄の物理特性から、葉柄が損傷を生じる風速を葉位別に試算した結果、第2葉が座屈する風速11 m/sと最も小さかった。具体的なしきい値は場合によるが、10m/s程度であれば、上方から気流を加えても、葉柄の損傷が生じないものと考えられた。

#### IV 生長点の露出に必要な気流条件の検討

##### 1. はじめに

植物が受ける気流とそのときの植物形状の変化について、石川（2005）は、樹木が側方から受ける風速が強くなると幹や枝のしなりが大きくなり、側方からの投影面積が小さくなることを示した。また、石田ら（2003）は、気流による物理的刺激が植物内の水分移動量に及ぼす影響を調べる研究の中で、風速に対して葉の揺れ幅が正比例することを明らかにした。しかし、関連する既往の研究例は少なく、イチゴに対する研究例は見られない。気流による植物体の動きは、植物の形状によって様々であると考えられ、また、目的とする動きを実現するための気流の加え方は、対象物個別に検討する必要がある。

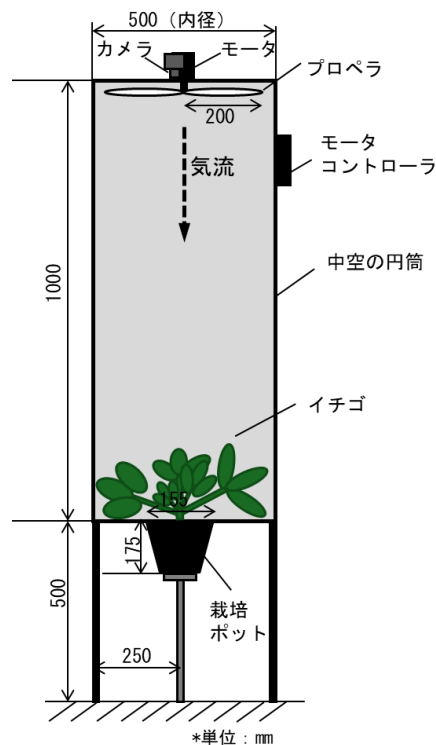
そこで本章では、株の上方から気流を加えて若葉が着生する株中心の、生長点周辺を暴露させるために必要な気流の強さを検討し、第Ⅲ章で述べた、葉柄を損傷しない 10 m/s 程度未満の風速で、若葉観測が可能かを明らかにする。

## 2. 材料及び方法

### (1) 実験装置

本研究が目指す若葉による生育診断の一つが、新葉の有無の観測である。第2葉以降の葉位を決定するのに必要で、また新葉の発生間隔なども重要な生長情報である。このため、通常は株の中心にあり生長した葉の死角となり隠れているクラウン（主茎）上端の生長点を、上方から撮影して観測する必要がある。そこで、株の上方から気流を加えて画像を撮影し、その風速と生長点の視認性の関係を調べた。

本実験では、第Ⅲ章で使用した実験装置（図Ⅲ-1）をベースに図Ⅳ-1 に示すような送風装置を用いた。変更点は、気流を加える作物を、直径 155 mm 栽培ポットに植えたイチゴ株とし、モータの横にデジタルカメラ（CASIO 社製、EX-ZR1800）を追加で設置した点である。気流を加えた状態のイチゴ株を上方から 30 枚/s で 1 秒間撮影した。



図Ⅳ-1 送風装置の概要

加える風速は0～6.0 m/s までを等間隔に8段階とした。風速の調節は、風速計（ARIA TECHICA 社製、AF101）と回転計（マザーツール社製、DT-2268）によって、送風装置内の風速とプロペラの回転数との関係をあらかじめ調べ、モータ

の回転数で行った。

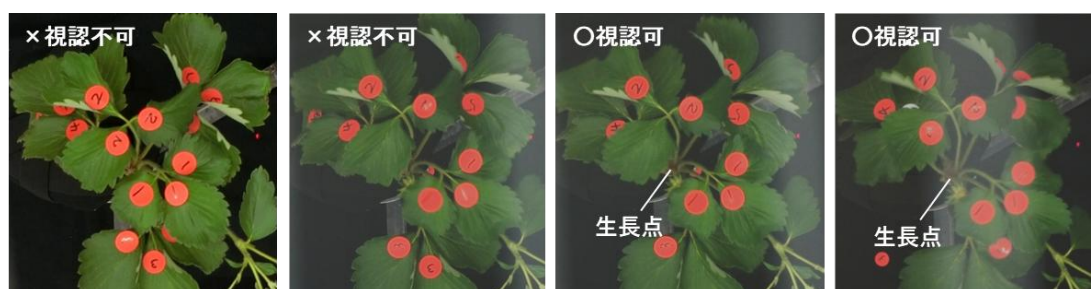
供試株数は「とちおとめ」19株で、各株、各風速条件あたり動画1秒間の30枚の画像（解像度 4,608×3,456）を供試した。また、新葉から第5葉までの葉面積（mm<sup>2</sup>）、葉柄長（mm）、葉柄の幅（mm）及び葉柄角度（°）も計測した。計測部位の具体的な部位は図Ⅲ-2に示した。葉面積は実験終了後に複写機でスキャンした画像から、画像処理ソフト（MVtec社製、HALCON）で計測した。なお、葉柄長の計測部位である図Ⅲ-2のyからtのうち、葉身と葉柄が接続する部分であるtを葉柄先端と呼ぶこととする。

## (2) 露出頻度と露出株割合

生長点の視認性の評価方法として、露出頻度を定義した。これは、一定の気流下でも葉が揺れ動くので、各株、各風速条件あたり30枚の画像で生長点が見える割合を確認した。

$$F_E = \frac{I_E}{I_A} \quad (12)$$

ここで、 $F_E$ は露出頻度（%）、 $I_E$ は生長点を目視確認できる画像枚数（枚）、 $I_A$ は供試画像枚数（30枚）である。このときの、視認できるかの判断基準例を図Ⅳ-2に示す。図Ⅳ-2右図のように、複数の葉柄が交差する部分が生長点である。出生直後の新葉がある場合、この部分に小さな葉身が見えることとなり、この場合は葉身を生長点とした。



図Ⅳ-2 生長点の視認可・不可の判断例

また、30枚の画像の中で1枚でも生長点が視認できれば観測は可能として、生長点が視認できた株の割合を、露出株割合と定義した。

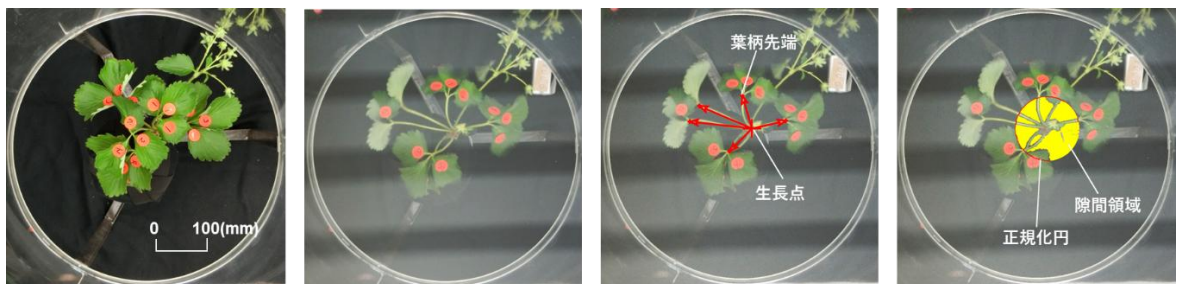
$$P_E = \frac{S_E}{S_A} \quad (13)$$

ここで、 $P_E$ は露出株割合（%）， $S_E$ は生長点が露出した株数（株）， $S_A$ は供試株数（株）である。

### (3) 葉柄先端の移動量

葉柄長や葉柄角度，葉面積は，葉位ごとに異なるため，気流の影響もそれぞれ異なると考えられる。そこで，葉柄先端の水平移動距離を葉位別に調べた。無風状態を初期位置として，カメラと培地面の距離 1,000 mm を基準に pixel から mm に換算した。

図IV-3 に送風装置内で上方から撮影した株の画像を示す。図IV-3 (a) は気流を加えていない状態で，気流を加えると図IV-3 (b) のように生長点から見て外側に葉が押し倒される。図IV-3 (c) は図IV-3 (b) に対して生長点と葉柄先端の座標を目視判断によって指定し，両座標を結ぶ線分の距離を計測した画像処理結果例である。



a) 送風前                      b) 送風時                      c) 葉柄先端座標の計測                      d) 隙間領域

図IV-3 葉柄の水平投影移動量と生長点周辺の隙間領域の画像計測例

### (4) 生長点周辺の隙間領域

葉柄先端の水平投影距離に応じて葉が移動すると，生長点周辺に空間が生じる。このとき，どの程度視認性が向上したかを評価するために，生長点周辺の植物体でない部分を，隙間領域と定義して検証した。隙間領域の計算は画像処理で行った。具体的には，植物体部分を強調するために G 画像を用い，事前に植物体部分を正しく選択できるしきい値を確認し，2 値化処理によって求めた。また，

各株の大きさの違いを考慮して，生長点周辺は株の中心から第 3 葉の葉柄長を直径とした円内として，この中の面積割合を正規化した。

$$O_R = \frac{A_0}{A_c} = \frac{4A_0}{\pi L_3^2} \quad (14)$$

ここで， $q_r$ は隙間領域の面積割合（%）， $A_0$ は円内の植物体以外の部分である隙間領域の面積（mm<sup>2</sup>）， $A_c$ は基準円の面積（mm<sup>2</sup>）， $L_3$ は第 3 葉の葉柄長（mm）である。図IV-3（d）に隙間領域の画像検出結果例を黄色で示す。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 作物条件

供試作物の計測結果を表IV-1 に示す。葉面積は、生長過程にある新葉が最も小さく平均 9,535 mm<sup>2</sup>、第2～5葉は平均で 17,666 mm<sup>2</sup>、葉柄長は新葉で平均 115 mm、第2～5葉で 162 mm であった。葉柄の幅は平均 3.3 mm、培地水平面に対する葉柄角度は、葉位が低いほど高い傾向で平均 77～52° であった。

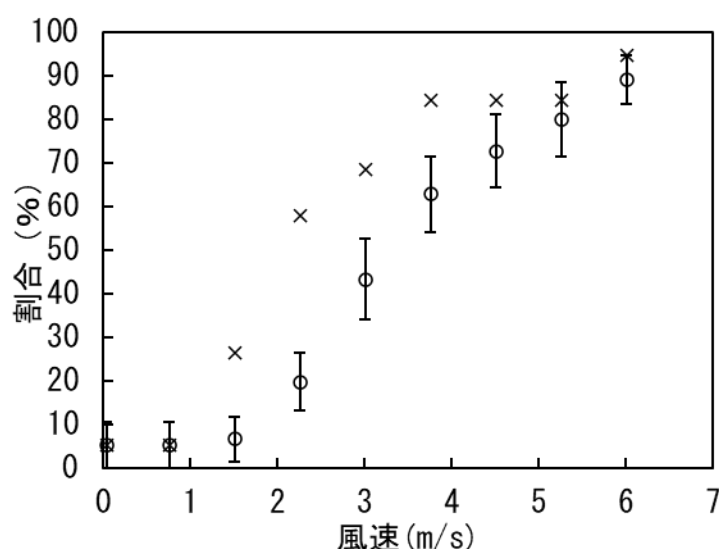
表IV-1 供試作物の形状 (n=19)

| 葉位  | 葉面積 (mm <sup>2</sup> ) |       | 葉柄長 (mm) |    | 葉柄の幅 (mm) |     | 葉柄角度 (°) |    |
|-----|------------------------|-------|----------|----|-----------|-----|----------|----|
|     | 平均                     | SD    | 平均       | SD | 平均        | SD  | 平均       | SD |
| 新葉  | 9,353                  | 5,940 | 115      | 46 | 3.0       | 0.8 | 76       | 13 |
| 第2葉 | 15,193                 | 6,390 | 167      | 33 | 3.3       | 0.7 | 77       | 7  |
| 第3葉 | 18,779                 | 8,300 | 161      | 42 | 3.3       | 0.7 | 62       | 13 |
| 第4葉 | 20,241                 | 9,183 | 166      | 50 | 3.3       | 0.6 | 60       | 14 |
| 第5葉 | 16,451                 | 9,105 | 153      | 45 | 3.2       | 0.7 | 52       | 18 |

#### (2) 露出頻度と露出株割合

株に上方から加えた気流の強さと、露出株割合及び露出頻度の関係を図IV-4 に示す。露出株割合は、無風の初期状態が 5.3 %で、風速 2.3 m/s から向上し 26 %に、風速 3.8 m/s では 84 %となったが、それ以上に風速を強めてもあまり変化しなかった。このことから、生長点観察には風速 4 m/s 程度が最低限必要であると考えられた。また、風速 6.0 m/s でも露出できない株があったが、新葉が幼く、葉柄が短く太いため動きが制限され、このカメラアングルでは撮影困難であった。この場合でも、後述するように移動しながら撮影することでアングルを変えられるため、露出株割合は向上できるものと考えられた。新葉が更に幼いと、未展開でまだ葉柄も出現していない状態となるが、この場合はその新葉そのものが生長点と考えてよいから、全く生長点が見えない状況はほとんど無いと考えられた。

露出頻度も露出株割合と同様に風速を高めるほど向上し、風速 1.5～4.5 m/s では 6.5～73 %であった。これは気流を受けた葉身が揺れ動くため、生長点が露出する撮影タイミングと露出しないタイミングがあった。風速が更に高くなると、後述するように生長点付近の葉身が移動することで視野を遮ることがほとんどなくなり、風速 6.0 m/s での露出頻度は 89 %となった。



\* n=19, × : 露出株割合, ○ : 露出頻度, エラーバーは標準偏差を表す。

図IV-4 イチゴ株の上方から加える風速と生長点の視認性

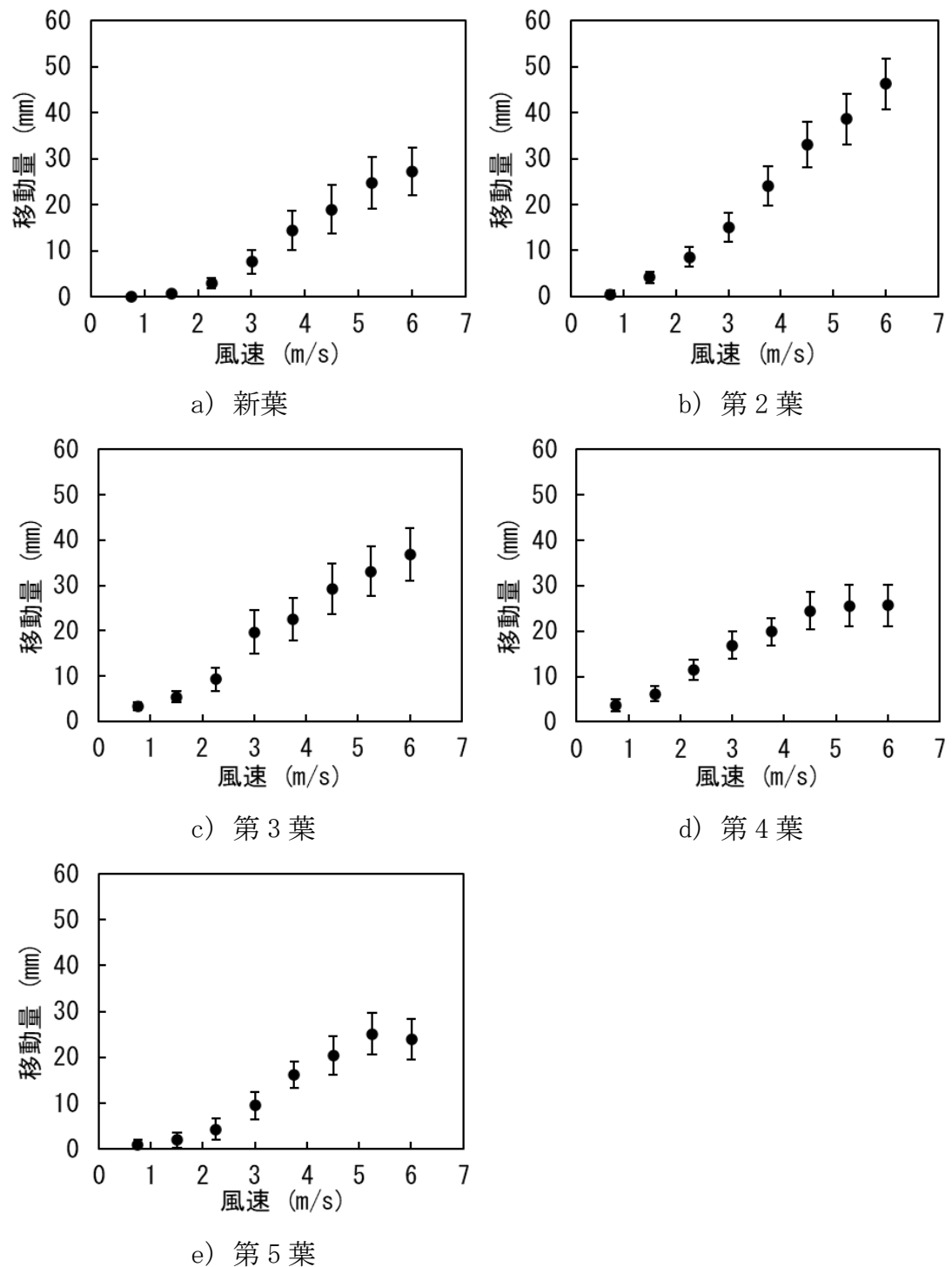
### (3) 葉柄先端の移動量

イチゴの株が上方から気流を受けた時の、風速と葉柄先端の水平投影距離の変化量の関係を図IV-5に示す。

葉柄先端は、気流によりクラウンからの着生部分から外側へ倒れるように移動し、想定通り生長点付近の葉を除くことができた。平均葉柄長 115 mm の新葉では風速 6.0 m/s で 27 mm の水平投影距離変化量となった。平均葉柄長が 167 mm とより長い第2葉では 46 mm であり、第3葉では 37 mm と第2葉より減少した。これは、平均葉柄長が 161 mm と第2葉より短いこともあるが、第3葉の葉柄角度が 62° と第2葉の 77° より小さかったため、実際の移動量に対して水平投影距離変化量の変化が緩やかになったものと考えられた。また、葉柄は下方へ倒れることに加え、たわみが生じるため、この影響による水平投影距離変化量の鈍化も含まれるものと考えられた。この鈍化は、第4, 5葉の風速 4.5 m/s 以上で顕著であり、ほとんど値が変わらなくなった。葉位が進むほど葉柄角度が小さくなるので、風力から受ける垂直分力が大きくなり、たわみも大きくなった結果、水平投影位置は変わらなくなったものと考えられた。

一方、風速の低い状態では、新葉の位置はほとんど変わらず、風速 2.3 m/s で 3 mm 移動しただけであったが、図IV-4の露出株割合では 26 %に向上した。風によって葉身の向きが変わり、その下の生長点が視認できたことによる。この葉身の向きは制御できないが、風速が高くなるほど葉身がよく向きを変えるように

なるので、生長点の視認にはそれ程大きく葉柄を動かす必要はなく、露出株割合が84 %となった風速 3.8 m/s で 14 mm であった。

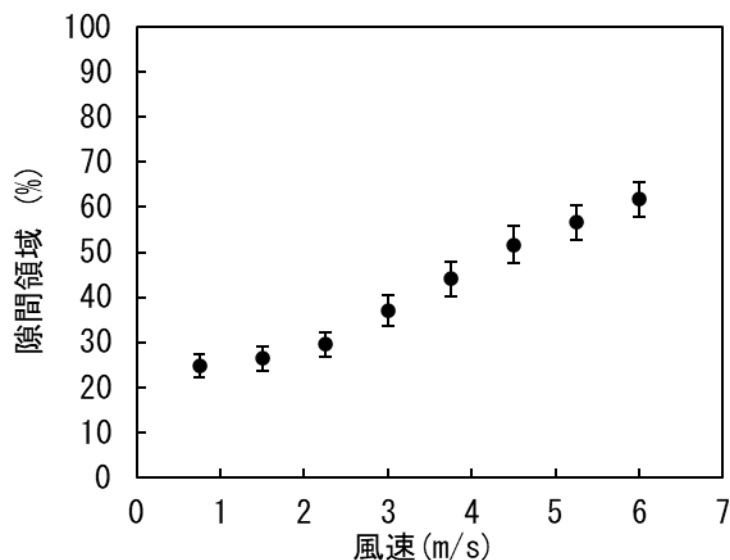


\*n=19, エラーバーは標準偏差を表す。

図IV-5 イチゴ株に上方から加えた気流の風速と葉柄の水平投影移動量

#### (4) 生長点周辺の隙間領域

株上方から加えた気流の風速と、気流によって曝露した生長点を中心とした隙間領域の関係を図IV-6に示す。隙間領域は、気流を加えない初期状態で25 %程度であった。風速を上げ、ほとんどの葉が移動してもクラウンや葉柄が円内に残るため、隙間領域の最大値は70 %程度となる。風速増加に伴う隙間領域の様子は、風速2.3 m/sから増加し、図IV-5の新葉の移動量の変化とよく似ていた。新葉は初期位置で円内にほとんどの葉が位置するため、その動きが他の葉の動きよりも大きく隙間領域の変化に関与したと考えられた。露出株割合が十分高くなったと考えられた、風速3.8 m/sでの隙間領域は44 %であった。これは70 %を10割とすると6割程度で、まだ半数ほどの葉が円内に残っている状態だが、生長点の視認はでき、葉柄の様子などを観察する場合には妨げとなるのが想定される。このような目的の場合には、風速を5.3 m/sとすることで56 %、これは70 %を10割として8割に相当するので、かなり見通しが改善されることが分かった。



\*n=19, エラーバーは標準偏差を表す。

図IV-6 イチゴ株に上方から加えた気流の風速と生長点を中心とする隙間領域

#### 4. まとめ

イチゴの株の上方から気流を加えて、通常は生長した葉で隠れている生長点を露出させる気流の強さを調べた。

風洞実験の結果、風速 6 m/s で 19 株中 18 株の生長点を露出させることができ、一定時間の露出頻度を算出すると、89 %であった。このとき、第 1～3 葉は水平投影距離にして 30～40 mm 程度、株の中心から外側へ移動しており、気流によって生長点周辺から葉を除けることができた。また、葉が動いて生じた生長点付近の隙間領域は、ほとんど葉が動いていない風速 0.8 m/s の 25 %から、風速 6.0 m/s では 62 %と 2.5 倍程度広がり、生育診断指標となる各若葉の葉柄や葉柄が短い若葉の葉身を画像認識するための条件も向上した。

第Ⅲ章において、イチゴの株が上方から気流を受けた場合、風速 10 m/s 程度が葉柄が損傷するリスクを生じるしきい値であることを試算した。一方、本章での検討結果より、新葉や第 2 葉が着葉する生長点周辺を露出するのに必要十分な風速は 6 m/s であったことから、イチゴの株の上方から気流を加えることによる若葉の観測は実現可能であることが明らかとなった。

## V ドローンを用いた移動観測法の検討

### 1. はじめに

第Ⅲ章及び第Ⅳ章において、イチゴ株の上方から風速 6 m/s 程度の気流を作用させることで、葉柄を損傷させることなく、新葉や第 2 葉が着葉する生長点付近を露出させることが可能であることを述べた。しかしながら、第Ⅱ章で述べた通り、計測した若葉の情報を生育診断に活用するためには、広範囲かつ高頻度な情報が求められるため、省力的な観測法が必要である。

本研究に限らず、一般に生長のばらつきを考慮して多数の株をモニタリングすることは、効果的な追肥、薬散、適切な環境制御及び高精度な収量予測等を行う上で重要である。このため、屋外ほ場においては、近年、省力化を図る目的でドローンによる空撮画像が利用されている。例えば、水田の窒素レベルの分類 (Yang et al., 2025), ジャガイモの収量推定 (Njanee et al., 2023), 病害の重症度評価 (Sugiura et al., 2016), タマネギの生育診断 (Yamamoto et al., 2020) などが挙げられる。しかし、ドローンの制御に用いられる全地球測位システム (GNSS (Global Navigation Satellite System)) は、柱や被覆材、培地、作物自体の影響による受信状態の不安定さから、温室内では利用が困難である。このため、温室内でドローンを用いた作物観察の研究例はあるものの (Fadami et al., 2021), 現状では定点観測 (Umeda et al., 2018 など) や、移動観測であっても機動性の低いレール走行型の台車を利用した研究例が主流である。例えば地面に設置したレール上 (温湯管) (Shimomoto et al., 2025) や、高い位置から吊り下げる方式 (加納ら, 2019) 等が見られる。

GNSS を利用しないドローン制御のニーズは、建築や土木分野で高く、近年いくつかの手法が提案されている。例えば、機体に搭載したセンサを用いる自己位置推定と地図作成 (Simultaneous Localization and Mapping: SLAM) (Suzuki, 2017), トータルステーションなど外部センサを利用した制御 (Ishii et al., 2020), 飛行経路上にあらかじめ設置したランドマーク (2 次元コードなど) の画像認識を活用した手法 (Kikuchi et al., 2019) が開発されている。農業分野でも、赤外線カメラを用いたモーションキャプチャ技術によるトマト温室内の自動飛行 (Hiraguri et al., 2023), イチゴ温室内の通路に敷設した線をトレースする自動飛行 (坪田ら, 2023) など、研究開発が活発化している。今後は、ドローンの利用が屋外のみならず温室内にも拡大すると期待されている。

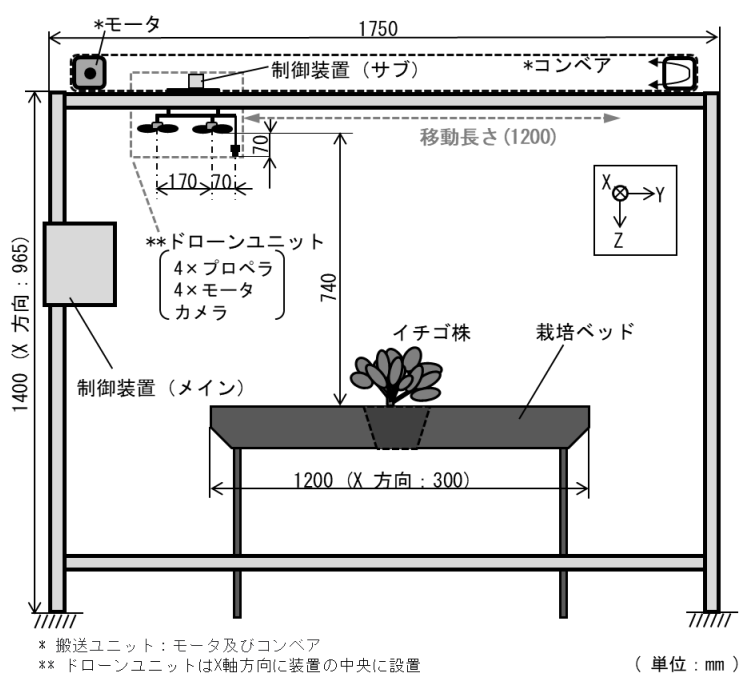
このように温室内を自律飛行できるドローンがあれば、イチゴ群落上方を移

動観測することで、飛行に必要な揚力を発生させる風圧（ダウンウォッシュ）を若葉の暴露にも利用することができ、効率の良いモニタリング技術が期待できる。そこで本章では、ドローンを用いて移動モニタリングすることを想定し、その可能性を検討した。

## 2. 材料及び方法

### (1) 実験装置

ドローンが、高設栽培の畝の上方を、作物列に沿って空撮することを想定し、その下降気流（ダウンウォッシュ）を利用して生長点を露出することに適した飛行方法について検討した。飛行状態では、位置や距離、気流が安定しないので、ドローンをフレームに固定した図V-1のような装置を試作した。ドローンは、プロペラを回転させるロータの数が、4つであればクアッドコプタ、6つであればヘキサコプタ、8つの場合はオクトコプタと分類され、クアッドコプタが最も普及している。このため、クアッドコプタを対象として研究を行った。



a) 実験装置の概要（側面図）



b) 実験装置の写真（側面図及び正面図）

図V-1 ドローンによる移動観測を想定した実験装置

筐体はアルミフレーム構造で、長さ 1,750 mm、幅 965 mm、高さ 1,400 mm の箱型である。筐体の上部長手方向に搬送ユニットを設置し、そのコンベアにドローンユニットを取り付けた。筐体に対し、ドローンユニットの移動方向や栽培ベッドの長手方向を Y 軸、高さ方向を Z 軸、これらに直行する栽培ベッド短手方向を X 軸とし、ドローンユニットは筐体の X 軸中央に設置した。

搬送ユニットは、ステッピングモータ（オリエンタルモーター社製、RKS564AA-TS3.6）を動力源としてコンベアを移動させることで、ドローンユニットを Y 方向に最大 1,200 mm まで定速で搬送する。ドローンユニットは、ブレード長 60 mm の 3 枚羽根プロペラがついた 4 つのロータを有するクアッドコプタ状の送風機と、前方ロータの中心から前方 70 mm、下方 70 mm に設置したカメラ（因幡産業社製、IB-MCT001）から成る。

ロータは、ブラシレス DC モータと一体で回転数を制御する ECU（Electronic Control Unit）も含めて ARRIS 社製の組立て式ドローン（X-SPEED 250B 250MM）の部品を用いた。ドローンユニットは、マイコンからの制御信号を受けると、設定された PWM（Pulse Width Modulation）制御の出力パルス幅でプロペラを回転させ、下方に気流を発しながら下方の動画を撮影し、記録媒体である SD カードに保存する。両ユニットは、2 台のマイコン（スイッチサイエンス社製、Arduino Uno R3）で動作を制御した。各々単独で動作させたり、連携して動作させることが可能である。

## (2) ドローンユニット下方の気流分布

ドローンユニットが発するダウンウォッシュの風速分布を調べた。ドローンユニットのプロペラ回転水平面から地面までの距離は 1,330 mm で、ドローンユニットを筐体 Y 方向中央に固定し、栽培ベッドは設置せず、筐体を含めて周辺に障害物が無い状態で計測した。

風速計にはアリアテクニカ社製 AF101 を用い、垂直 Z 方向の風速を各座標で各々 20 秒間計測して平均し、下方向を正として記録した。計測位置は、プロペラから下方 Z 方向に 255, 425, 595, 765, 935 mm、ドローンユニットの中央から水平 X 方向に、-255, -170, -85, 0, 85, 170, 255 mm、水平 Y 方向に 0, 85, 170, 255 mm の地点（計 140 座標）とした。モータの出力は、計測空間内で風速が 10 m/s 程度以内で丁度良く分布した 45 %とした。

### (3) 気流の作用位置と風速分布

栽培ベッド上方を作物列に沿って移動観測することを想定し、X 方向の最適な位置を確認した。高設栽培のベッド幅は 300 mm で、株間は 200 mm の千鳥植えを想定した。栽培ベッドの設置高さは、高設栽培を行う温室内で確保可能なよう、プロペラから下方 740 mm とした。風速の分布は、植物体は置かずにベッド上面をプラスチック製段ボールで覆い、上方からの気流が栽培ベッド上面に当たったときの状態を計測した。

計測位置は、栽培ベッド上面を  $Z=0$  として高さ 10, 85, 160, 235 mm, 栽培ベッド中央を  $X=0$  として距離 0, 75, 150, 255 mm で計 16 座標とした。気流の方向は垂直  $Z$  方向は下向きを、水平  $X$  方向はベッド外向きを正とし、各座標の風速は 20 秒間計測の平均値とした。また、ドローンユニットが上方から吹き降ろした気流は、栽培ベッドに当たり側方に変化することが想定され、水平方向への気流が生長点の露出に及ぼす影響の検討を行うため、風速の計測方向を垂直 ( $Z$  方向) 及び水平方向 ( $X$  方向) の 2 方向とした。

ドローンユニットの位置は、 $X$  方向に栽培ベッドを移動させることで 4 条件を設定した。ドローンユニット中央が栽培ベッド中央となる (a)  $X=0$  mm, 作物直上となる (b)  $X=75$  mm, 栽培ベッド端となる (c)  $X=150$  mm, 及び通路上となる (d)  $X=255$  mm である。

### (4) 気流の作用位置と生長点の視認性

視認性の調査は (図 V-2), ポット植えのイチゴ株を、栽培ベッドの  $X=75$  mm に培地面が栽培ベッドの上面と一致するように設置しドローンユニットを栽培ベッドに倣って図 V-1 の  $Y$  方向に移動観測させて行った。前述 (a) ~ (d) の 4 条件で、栽培ベッド付近に加える風速を、イチゴの葉を損傷させず、生長点を露出させるのに十分な風速 6 m/s 程度として、ドローンユニットの移動速度は撮影検証用に低速の 10 mm/s とした。

評価は風洞実験と同様の露出頻度と露出株割合を、移動撮影した動画から算出して行った。露出頻度は、株間 200 mm を想定し、長さ 400 mm を株あたりのモニタリング区間として 0.5 秒 (5 mm) 間隔で撮影した 80 枚の画像に対し、目視で生長点を確認可能な画像枚数の割合とした。露出株割合は、供試株数のうち生長点が見えた画像が 1 枚以上ある株数の割合とした。

供試品種は「とちおとめ」、株数は 10 株で、葉数が平均 8.2 枚 (標準偏差 0.6 枚)、株の総葉面積が平均 58,674 mm<sup>2</sup> (標準偏差 25,367 mm<sup>2</sup>)、葉柄長は平均 96

mm（標準偏差 16 mm），葉柄角度は平均  $42^{\circ}$ （標準偏差  $9^{\circ}$ ）であった。また，気流が加わる高さに関する指標として，葉身の培地面からの最大高さは，平均 98 mm（標準偏差 24 mm）であった。

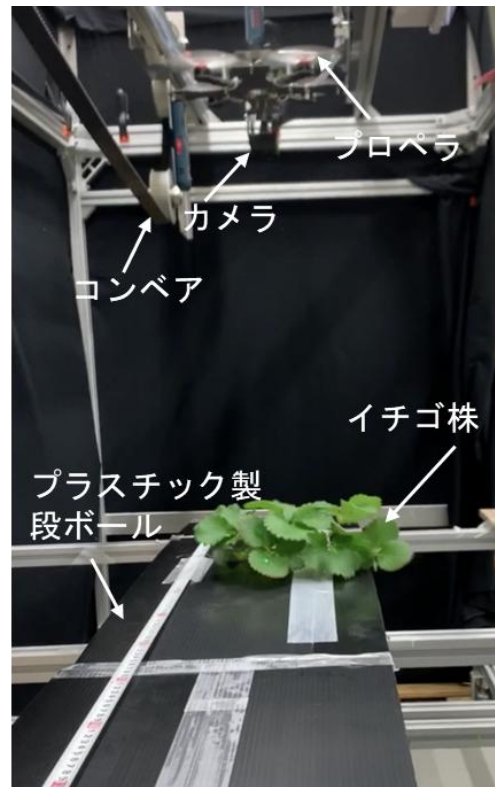
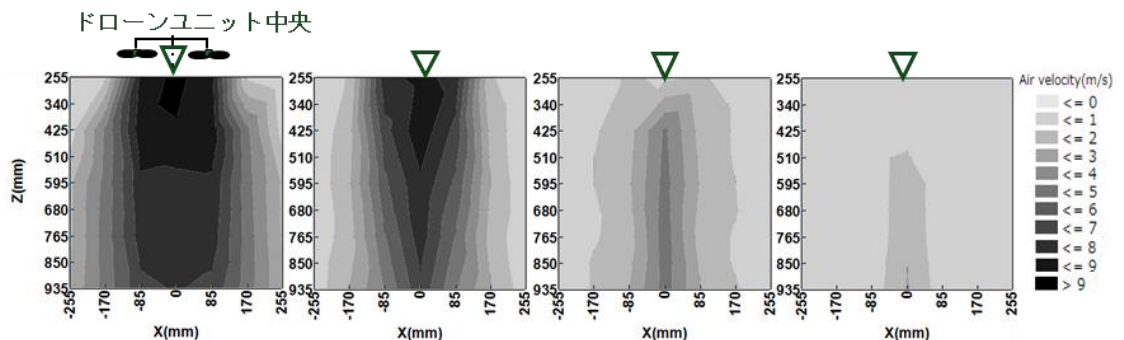


図 V-2 気流の作用位置と生長点の視認性の調査の様子

### 3. 結果及び考察

#### (1) ドローンユニット下方の気流分布

実験装置のドローンユニット下方の気流分布を図 V-3 に示す。これは、ドローンがホバリング時に発するダウンウォッシュの分布に相当し、4つのロータ中心付近から機体下方に向けて半径 85 mm 程度の円筒状の気流が観測された。この気流は 7~9 m/s の風速で、800 mm 下方に吹き付けており、ホバリングなどドローンの安定した姿勢の維持に寄与しているものと考えられた。またドローンユニット直下の作物にダメージを与えない程度であった（坪田ら、2022）。これは、今回の観測にも都合が良く、狙った位置に安定した風速を与えることで、効率良く葉や葉柄を移動させることが期待される。広がりも小さく、株間 200 mm に対して（d）Y=255 mm では中央半径 40 mm に 0~1 m/s の風速が観測されただけであったことから、周囲への影響は大きくないと考えられる。この風速は距離に応じて減衰するので、飛行高度によっても調節できる。加えて、円筒状の気流は風洞実験の様子に似ており、これまでの実験結果も有効に利用できる。



\* $z=0$  はドローンユニットのモータ下面,  $x=0$  はドローンユニット中央

図 V-3 ホバリング時のクワッドコプタのダウンウォッシュの風速分布

#### (2) 気流の作用位置と風速分布

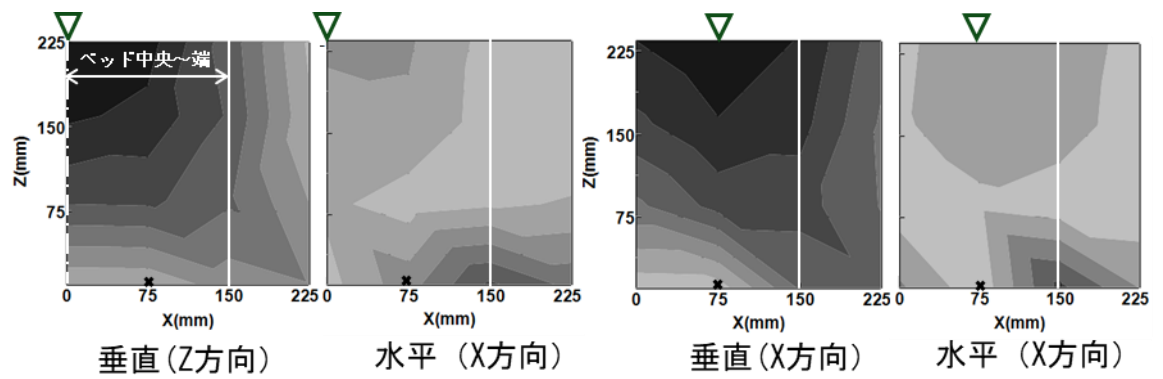
ドローンユニット下方に栽培ベッドがあるときのベッド付近の風速分布を図 V-4 に示す。この分布図の  $x=0$  mm は栽培ベッドの中央,  $x=150$  mm は栽培ベッドの端であり、栽培ベッドの半分と通路上の分布を表す。ベッドの中央に吹き下ろす条件（a）では、風速 7 m/s が及ぶのはベッド上 100~150 mm 程度までで、これは図 V-3 の 640~690 mm 付近に該当した。葉身がある  $Z=75\sim150$  mm,  $X=0\sim150$  mm では、生長点を露出するのに十分な風速 5~7 m/s であった。栽培ベッドがないときと比べてドローンユニットからの  $Z$  方向距離に対する風速が減衰したのは、ベッドからの跳ね返りで風速が相殺されたためで、ベッド上面付近では

3 m/s 以下まで低下した。ベッド上面に当たった気流は垂直に跳ね返るとともに、通路側へ向かって流れた。水平方向への風速は、作物列位置の  $X=75$  mm からベッド中央側、栽培ベッド上面に近い  $Z=75$  mm 以下において風速 2~4 m/s が流れた。また、作物列から通路側のベッドの端 ( $X=150$  mm 付近) で高く、最大 6 m/s であった。

作物列直上から吹き下ろす条件 (b) でも同様に、栽培ベッドでの跳ね返りや、ベッドの端に吹き抜けていく様子が確認できた。条件 (a) に比べて、垂直成分では  $X=75$  mm の作物列からベッド中央方向にあった、ベッド上面付近の風速 3 m/s 程度の弱風空間が広く、 $X=150$  mm 以上の開放空間 (通路) に向けては、より強い風が吹き抜けた。水平成分では条件 (a) と比べて、 $X=75$  mm の作物列中央からベッド中央の間が弱く、作物列中央から通路側に向けては強くなる分布となった。作物列から見てベッド中央側と通路側で異なる分布となるため、葉の挙動には注目する必要がある。

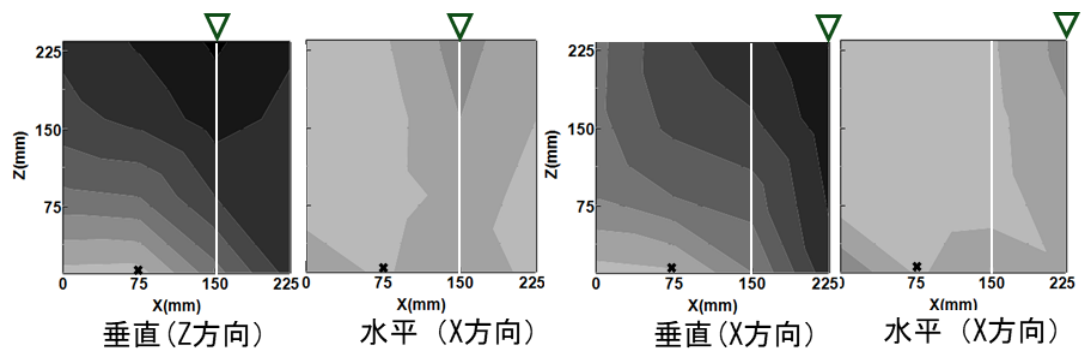
条件 (a) との対比として準備した、ベッドの端に吹き下ろす条件 (c) では、気流の半分が通路に抜けるため、ベッドの上の風速が弱まり、風速変化も穏やかになった。水平成分の弱風空間も広くなり、作物列から等距離でありながら条件 (a) とは全く異なった分布となった。

ベッド上での気流の跳ね返りの影響をなるべく減らす目的で設定した通路上を飛行する条件 (d) では、狙い通り強い風は通路に向かって吹き抜け、ベッド上の風速変化の分布も条件 (c) より更に穏やかになった。水平成分もほとんど無くなり、株周辺の気流は、上方から下方の気流で生長点を隠す葉を株の中心から外側へ押し倒す本研究の目的と合致する点で、比較的整っているものと考えられた。



a) ドローンが栽培ベッド中央のとき

b) ドローンが作物列直上のとき



c) ドローンが栽培ベッド端のとき

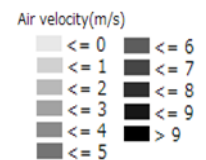
d) ドローンが通路上のとき

▽ : ドローンユニットの中央

× : 作物の中央

\*栽培ベッドは X=150~150 mm に設置され,

Z 軸は栽培ベッド上面からの高さを表す。

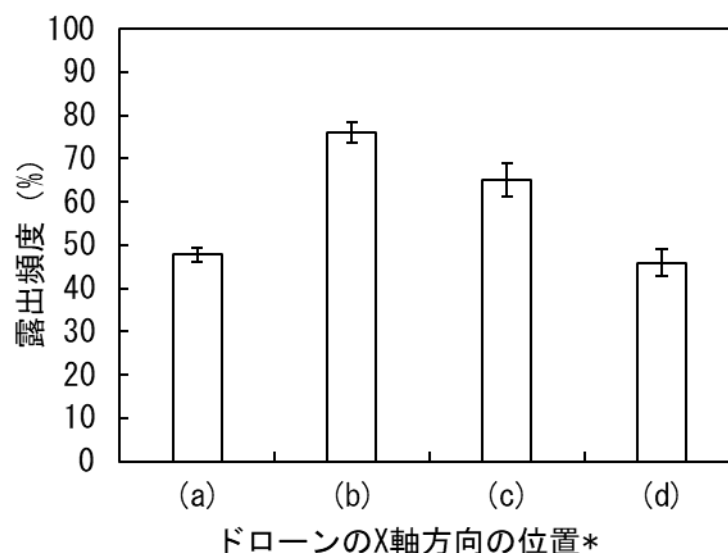


図V-4 栽培ベッドに遮られたダウンウォッシュの風速分布

### (3) 気流の作用位置と生長点の視認性

移動観測画像における露出株割合は、条件 (a) から (d) のいずれも 100 % であった。これは、最低風速 3.8 m/s 以上とした風洞実験の結果に対して、株周辺には最大 2 倍程度の強さの気流が加わることに加えて、撮影アングルが株中心から 150° の範囲と広くなり、死角が減ったことによる。

生長点の露出頻度を図 V-5 に示す。露出頻度は、作物列の直上とドローンユニットの中央を合わせた条件 (b) で 76 % と最も高くなったが、風洞実験の 89 % には及ばなかった。X 方向は直上であるものの、Y 方向はほとんどが中心がずれた状態となることや、葉柄の倒れる方向が株に近づくときと遠ざかるときでは異なることに加えて、ベッド上の気流は複雑で変化も激しくなり、葉を株の中心から外側へ押し倒して生長点を露出するためには、条件が厳しかったことが原因と考えられた。



\*ドローンの X 軸方向の位置 (a) から (d) は図 V-4 を参照, n=10

図 V-5 栽培ベッドに対する気流の作用位置が生長点の視認性に及ぼす影響

ベッド上の気流が生長点の露出に与える影響は、株までの距離が等しい条件 (a) と (c) の違いによく現れていて、ベッド中央の条件 (a) が 48 % と低かったのに対して、ベッド端の条件 (c) が 65 % となった。条件 (a) ではベッド上の気流の影響により、作物列からベッド中央側の葉のうち、第 6～第 8 葉は葉身の高さが  $Z=65\sim72$  mm と低く、それより下方を通過する水平方向の気流によって持ち上げられたり、持ち上げられた葉や、もともと  $Z=75\sim150$  mm 付近にあ

った第2～第4葉が、通路側へ押し倒されるように作用したためであった。これにより、株全体でみると、通路側へ押し倒されるような恰好となり、ベッド中央側に展開した葉が生長点を覆い隠す動きをした。条件(c)でも押し倒される株はあったが、葉の多くは各々生長点から見て外側へ押し広げられる方向に移動し、より生長点の視認性が高かった。

図V-4では良好な風速分布であった条件(d)であるが、露出頻度は46%と最も低くなった。これは、気流がほとんど作用しない地点の観測結果も計算に用いているからで、例えば、葉に風速5～6 m/sの気流が加わる、 $Y = -85 \sim 85$  mmの移動観測区間に限って言えば、露出頻度は平均72%と条件(c)と同等程度であった。このため、条件(d)でも風速の分布を考慮して、葉に加わる風速を十分な強さとすることで、条件(c)と同等に生長点の露出が可能と考えられた。

以上より、ドローンを飛行させる場合には、作物列上とするのが生長点付近を最も良く観察できることが分かった。千鳥植えの場合には、ベッド中央の、作物列と作物列の間を飛行すると、作物列上を飛行するよりも観察機会が減るものの、生長点及びそこから出葉した発生直後の新葉を観測可能で、2つの作物列の新葉を同時に観測できる可能性が見込まれた。栽培ベッド端から通路上の間の飛行では、観測対象の株全体に生長点を観測するのに十分な風速6.0 m/s程度を加えることができるよう、飛行高度と作物列に対して垂直(X)方向の飛行座標を調整することで、生長点の観察機会が作物列直上に次いで高くなると考えられた。栽培ベッドに当たる気流を最小限に抑えることができ、葉が側方等の想定しない方向に不規則に動くことを避けるために有効な観測位置であると考えられた。イチゴの葉序は2/5で、生長点を中心に水平方向144°おきに着葉していて、各葉が側方に不規則に動くとき葉同士が重なり合う可能性が高まる。今後、画像処理によって診断指標の新葉から第3葉の葉柄長や葉面積を葉位別に計測することを目指すには、通路上は、画像計測を行う上で有利な観測位置である可能性が示唆された。

#### 4. まとめ

ドローンが作物列に倣って移動観測することを想定し、作物列に対する気流の作用位置が生長点の露出に及ぼす影響を調べた。

移動観測では定点観測より撮影アングルが広がることで、倒れにくい新葉の死角にある生長点も撮影が可能であった。気流の作用位置による生長点の露出頻度は、作物列の直上が76 %と最適であり、次いで栽培ベッド端で65 %であった。栽培ベッド中央では、ベッドに当たった風が通路方向に流れて株全体を押し倒すため、48 %と低くなった。株全体が倒れると各葉が分離されず重なり合うため、若葉の葉身や葉柄の画像認識には不利であるが、発生直後の短く若い新葉の検出は可能と考えられる。この新葉を対象を絞れば、ベッド中央を飛行することで2作物列を同時に観測できることが見込まれた。通路上では、十分な強さの気流を株全体に加えることができれば、栽培ベッド端と同等の露出頻度になると考えられた。栽培ベッド上面の気流の乱れが最も少ないため、側方等への葉の不規則な動きを最小限に抑えることが可能であり、葉同士が重なり合いにくいものと考えられるので、葉身や葉柄を画像認識するのに有利であることが示唆された。

以上、本章の結果より、ドローンの移動観測によって、省力的に多数の株の若葉を撮影する方法が明らかとなった。

## VI 移動観測動画を用いた作物個体の識別手法

### 1. はじめに

第V章では、ドローンによる作物列上の移動観測を想定し、そのダウンウォッシュを活用して、新葉や第2葉が着葉する生長点付近を省力的に移動観測する手法について述べた。しかし、新葉や第2葉の大きさなどの経時変化までを省力的に観察するには、撮影した多数の作物個体を識別し、同一個体の生長の変化を追跡することが必要である。

第V章でも述べたが、近年、屋外ほ場においては、ドローンの空撮により広範囲の作物を空撮し、各種栽培管理等の最適化に活用されている。これらの取り組みの中には、空撮画像等から作物個体までの詳細な観測を行うための識別技術の研究も進められている。例えば Tanaka ら（2021）は、隣接作物の葉が重なっていない場合に、ドローンによる空撮画像から合成したオルソ画像を用いてキャベツを個体ごとに分類する手法を検討した。Guo ら（2020）は、空撮画像から圃場を三次元再構築し、高さの違いを利用して作物と雑草を分離する手法を開発した。Sugiura ら（2021）は、空中から定期的に撮影した圃場の合成画像をもとに、個体識別のための機械学習などの手法を用いて、作物個体の生長を時系列で計測する技術を提案した。

しかし、これらの手法は数十メートルの飛行高度が必要な屋外でのみ実施可能であり、数メートルの高度しか取れない温室内への適用は困難である。温室内でドローンが真下を撮影した場合、同時に撮影できる作物個体の数はごくわずかである。さらに、移動しながら撮影した画像を用いて高精度な3次元再構築やオルソ画像を生成するためには、通常、地上基準点として多数のマーカーを設置する必要があるが、温室内で同様の手法を適用するのは非現実的である。

このような背景を踏まえ、本章では、温室内でドローンが作物列上から撮影した、移動観測動画を用いて作物個体を識別し、位置情報を付与する手法を検討した。

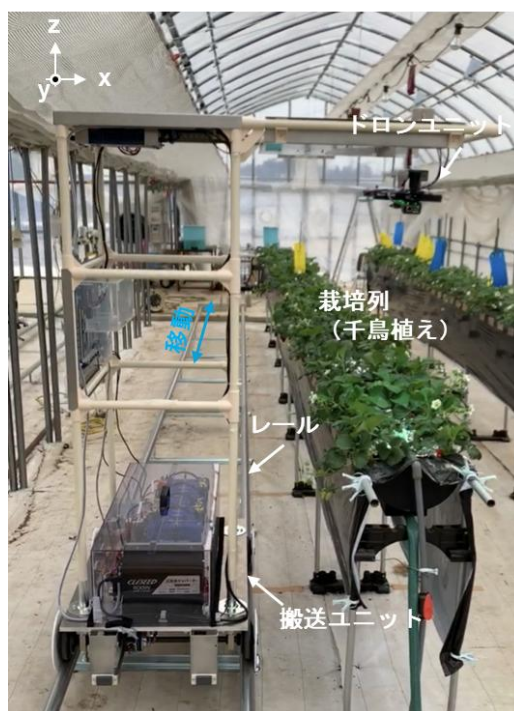
## 2. 材料及び方法

### (1) 供試作物

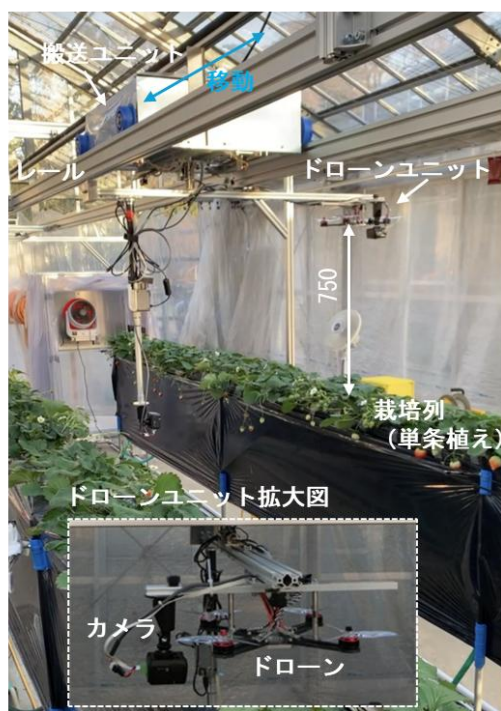
個々の株の物体検出モデルの作成および評価には、農研機構（茨城県つくば市）において、千鳥植えで 8.4 m の長さの畝に植えられた 84 株を使用した。また、本研究で開発した、作物個体の識別アルゴリズムの精度検証には、同機構（埼玉県さいたま市）の温室において、単条植えで 6 m の長さの畝に植えられた 30 株を用いた。両実験とも、9 月下旬に 200 mm の株間で定植し、温室内で最低温度を 10℃に設定して栽培された作物を対象とした。

### (2) 実験装置

本実験では、栽培ベッドに沿って、作物列上方をドローンが飛行することを想定し、図VI-1 に示す実験装置を試作して試験を行った。搬送ユニットとそれに固定されたドローンユニットからなり、移動時に高度や位置が変化することなく、レール上を安定して移動する。したがって、後述する画像処理手法の検討においても、移動の精度が影響を及ぼすことはなかった。



a) 学習画像の収集用実験装置  
(農研機構（つくば市）)



b) 開発アルゴリズムの検証用実験装置  
(農研機構（さいたま市）)

図VI-1 実験装置及び栽培ハウスの外観

ドローンユニットは、第V章の図V-1 示した実験装置と同じであり、4 つのプロペラと下方を撮影するカメラからなる。ロータのパルス幅変調 (PWM) 出力および下方への気流分布は第V章に既出である。

搬送ユニットも図V-1 と同様にステッピングモータによって駆動するが、コンベアではなく、水平に設置されたレール上を一定速度で移動する。レールは、つくば市の実験装置では地上に設置した温湯管を用い、さいたま市の実験装置は栽培ベッド上部に設置した。これらの違いは、温室の形状によるもので、両装置には性能上の差はない。

ドローンユニットのロータは、栽培ベッドの天面から 750 mm の高さとした。また、4 つのロータの中央が作物列の直上となるように配置した。ドローンユニットは作物列に沿って移動しながらプロペラを回転するとともに、気流が作用した状態の作物を上方から動画で記録する。各実験において、ダウンウォッシュの風速は生長点付近が露出するのに必要な 4.5 m/s となるように設定した。動画を撮影するカメラの解像度は  $1,920 \times 1,080$  ピクセル、フレームレートは 30 fps であり、水平方向 (x 方向) と垂直方向 (y 方向) の画角はそれぞれ  $110^\circ$  および  $56^\circ$  であった。したがって、カメラから 750 mm 離れた栽培ベッド上面を上方から撮影した際、移動方向における画像の解像度は約 0.74 mm/ピクセルに相当した。搬送ユニットの移動速度は 0.1 m/s とした。

つくば市の実験装置は、直流電源 (鉛蓄電池) を 100 V の交流に変換し、さいたま市の実験装置は 100 V の交流電源によって駆動する仕様とした。

### (3) 画像解析法

#### a. 作物個体の物体検出モデル

画像中から物体を検出する画像処理手法として、大きく分けて、深層学習を用いる方法と、深層学習を用いないルールベースによる方法がある。本研究では、生長に伴う作物の形状変化や、その時々 of 光環境のばらつきを包括した検出精度を担保するため、深層学習の物体検出モデルを用いて作物個体の検出を試みた。

物体検出モデルは、農研機構 (つくば市) の温室において 7 か月間にわたり、異なる時期に学習画像の収集用実験装置で撮影された動画を用いて作成した。具体的には、2020 年 10 月 19 日、11 月 11 日、12 月 16 日、2021 年 1 月 15 日、2 月 16 日、3 月 15 日、4 月 15 日に撮影した動画を用いた。30 fps の動画から 15 フレームごとに抜き出した、1 日あたり平均 1,548 フレームに対し、アノテ

ーションを行った。その結果, 8, 480 個の作物個体の領域を指定し, そのうち 80 % (6, 784 個体分) を学習用, 20 % (1, 696 個体分) を検証用に使用した。

アノテーションにおいて, 隣接する作物個体は密に重なり合うことが多く境界が曖昧であり, 個体ごとに明確に領域を分けることは困難である。そのため, 隣接する個体の生長点を指定範囲に含めないことをルールとして定めた以外は, 境界は目視による主観的判断で決定した。

学習には画像処理ソフトウェア HALCON (MVTec 社製) を使用した。画像解像度は  $640 \times 352$  ピクセルに縮小し, 高精度検出に推奨される「Enhanced」を物体検出モデルとして選択した。バッチサイズは 18, エポック数は 70 に回設定した。検出モデルの評価には適合率 ( $P$  (%)), 再現率 ( $R$  (%)), および F 値 ( $F$  (%)) を使用した (式(15)～(17))。

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (15)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (16)$$

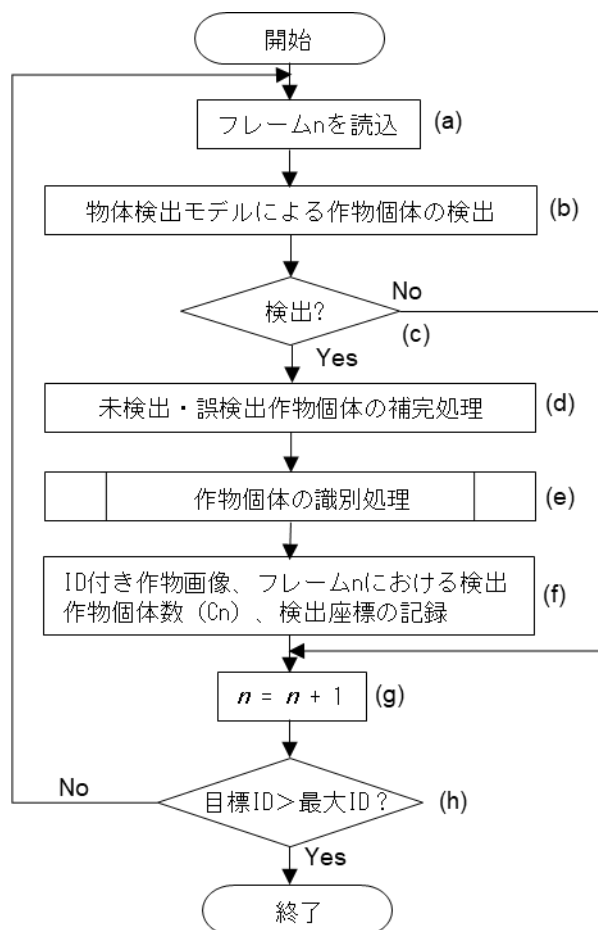
$$F = \frac{2RP}{R + P} \quad (17)$$

ここで,  $TP$ ,  $FP$ ,  $FN$  はそれぞれ真陽性, 偽陽性, 偽陰性の数を示す。以降, 偽陰性は「未検出」, 偽陽性は「誤検出」と定義する。

さらに, 作物検出モデルの有効性を検証するため, 上記とは別の画像データを用いて, 適合率 ( $P$  (%)), 再現率 ( $R$  (%)), および F 値 ( $F$  (%)) を評価した。具体的には, 2020 年 10 月 29 日, 11 月 30 日, 12 月 27 日, および 2021 年 1 月 28 日, 2 月 22 日, 3 月 25 日, 4 月 19 日に観察された 30 fps の動画から, 100 フレームごとに抽出した合計 686 フレーム (各日 98 フレーム) を用いた。

## b. 作物個体の識別アルゴリズム

画像処理アルゴリズムのフローチャートを図VI-2 に示す。識別は、特定の作物列内で各作物個体に固有の ID を割り当てることで実施した。画像処理アルゴリズムの詳細は以下の通りである。

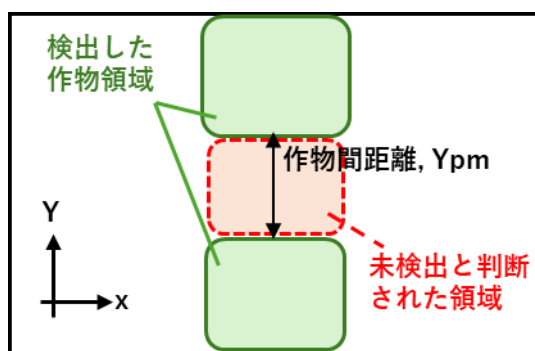


図VI-2 作物個体の識別アルゴリズム

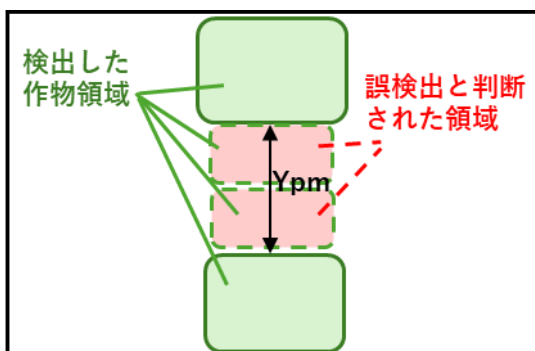
まず、作物列の動画から分割されたフレームを読み込む（図VI-2 (a)）。そのフレームに対して作物個体の物体検出モデルを用いて作物の検出を行う（図VI-2 (b)）。動画は作物列の端から撮影されるため、最初はフレーム内に作物が存在せず、作物は検出されない。しかし、フレームが進行するにつれて（図VI-2 (g)）、最初の作物が検出されると（図VI-2 (c)）、識別処理が開始され、ID の割り当てが開始される。

ID の割り当てが始まると、作物個体の物体検出が正しく行われなかった場合、次のような基準で判断し、補完処理を行う（図VI-2 (d)）。隣接する作物個体の

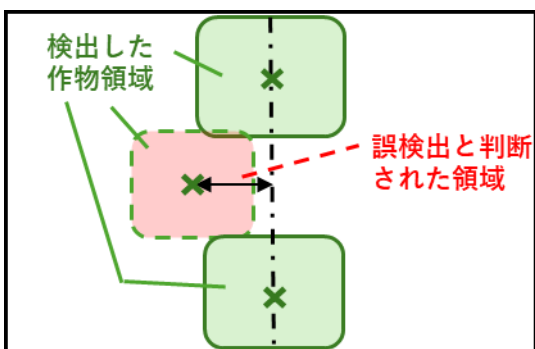
検出領域が株間 (200 mm) 以内にはない場合は、未検出と判断される (図VI-3 (a))。未検出領域には、物体検出によって検出された作物個体領域と同様に ID を付与する (図VI-2 (e) 以降参照)。また、隣接する作物個体の検出領域から 200 mm 以内に複数の検出があった場合、それらは誤検出と判定する (図VI-3 (b))。さらに、検出領域の重心の  $x$  座標が作物列から一定量ずれていた場合も誤検出と判断する (図VI-3 (c))。



(a) 未検出の例



(b) 誤検出の例 1



(c) 誤検出の例 2

図VI-3 作物個体の誤検出及び未検出の判断処理の例

次に、物体検出、及び、補完処理によって推定された作物領域を用いて、ID の識別処理を行う。ここで、フレームの最上部にある作物領域を ID\_top、最下部の領域を ID\_bottom と定義する。識別処理では、移動前のフレームでカウントされた領域数 ( $C_{n-1}$ ) と現在のフレームの領域数 ( $C_n$ ) の差分 ( $C_{ch}$ ) を算出する。差分が 0 の場合、同じ個体が検出されたこととし、前フレームと同じ ID\_top が割り当てられる (図VI-4 (a), (b))。差分が 1 の場合、新たな作物個体が検出されたとみなし、ID\_top を 1 増加させる (図VI-4 (b), (c))。差分が-1 の場合、前フレームの ID\_bottom がフレーム外になったと判断し (図VI-4 (c), (d)), ID\_top は前フレームと同じ値を保持し、ID\_bottom を 1 増加させる。

識別処理が終了すると、生体情報の計測に使えるよう、ID 名、検出座標や観測日の情報を付加した作物個体の画像を、検出した領域の重心を中心に所定のサイズで保存する (図VI-2 (f))。

以上の処理を作物列の末端でフレーム内に作物個体の領域の検出がなくなるまで繰り返す (図VI-2 (h))。

ただし、図VI-2 (e) および図VI-4 に示した識別処理を実現するためには、処理対象とするフレーム間の間隔が重要である。フレーム間隔が作物間の距離よりも長い場合、撮像されない作物個体が生じるためである。すなわち、連続する 2 フレーム間で画像内の最上部および最下部の作物が同時に変化しないようにするためには、ドローンの飛行速度に対して十分に高いフレームレートを設定する必要がある。処理に用いるフレームレートは、次の条件を満たす必要がある。

$$k > \frac{v}{Y_{pm}} \quad (18)$$

ここで、 $k$  (フレーム/秒) は処理フレームレート、 $v$  (mm/秒) はカメラの移動速度、 $Y_{pm}$  (mm) は作物間の距離を表す。

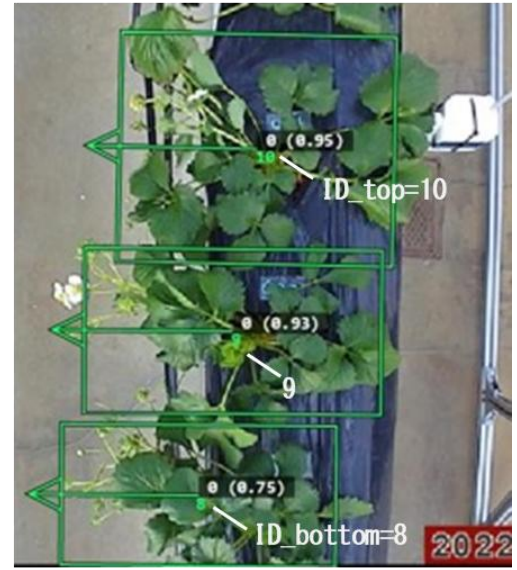


$$C_{n-1} = 3$$

$$ID\_top_{n-1} = 10$$

$$ID\_bottom_{n-1} = 8$$

(a) Frame  $n-1$

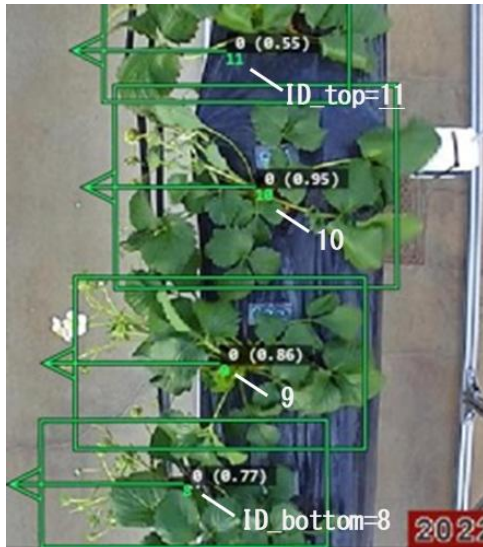


$$C_n = 3, C_{ch} = C_n - C_{n-1} = 0$$

$$ID\_top_n = ID\_top_{n-1} = 10$$

$$ID\_bottom_n = ID\_bottom_{n-1} = 8$$

(b) Frame  $n$



$$C_{n+1} = 4, C_{ch} = C_{n+1} - C_n = 1$$

$$ID\_top_{n+1} = ID\_top_n + 1 = 11$$

$$ID\_bottom_{n+1} = ID\_bottom_n = 8$$

(c) Frame  $n+1$



$$C_{n+2} = 3, C_{ch} = C_{n+2} - C_{n+1} = -1$$

$$ID\_top_{n+2} = ID\_top_{n+1} = 11$$

$$ID\_bottom_{n+2} = ID\_bottom_{n+1} + 1 = 9$$

(d) Frame  $n+2$

図VI-4 作物個体の識別処理の例

#### (4) 作物個体識別アルゴリズムの精度検証

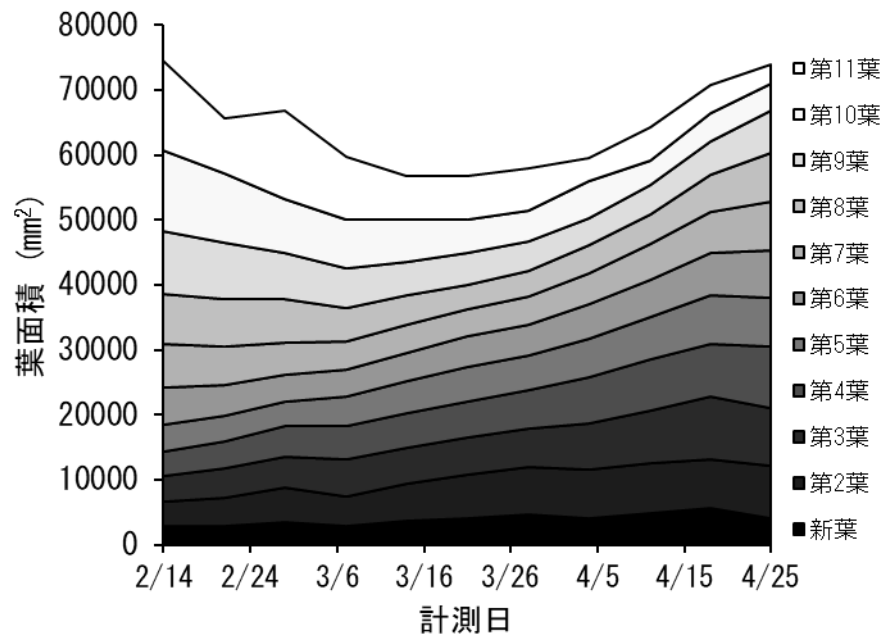
農研機構（さいたま市）の温室内において、2021 年 9 月 27 日に品種「とちおとめ」30 株を、幅 150 mm の栽培槽に株間 200 mm で定植した。その後、生長した苗に対し、2022 年 2 月 15 日から 4 月 21 日までの間、1 日 1 回、実験装置による観測を行った。ただし、2 月 20 日、3 月 12 日、3 月 13 日は実験設備の都合により観察ができなかった。このため、それ以外の日に撮影された動画を用いて作物個体の識別アルゴリズムの精度検証を行った。特に、作物が誤検出または未検出となった場合に、アルゴリズムがそれをどの程度判定できるか、及びその原因について検討した。

観測装置の速度は 0.1 m/s であり、作物間の距離が 200 mm であることから、本アルゴリズムは式 (18) によって計算される 0.5 fps を超える処理頻度が必要となる。本検証では、30 fps の動画から 3 フレームごとに抽出した 10 fps を使用し、十分な処理頻度を確保した。その結果、精度検証には、1 日あたり 600 フレーム、合計 63 日間で 37,800 フレームが供試された。

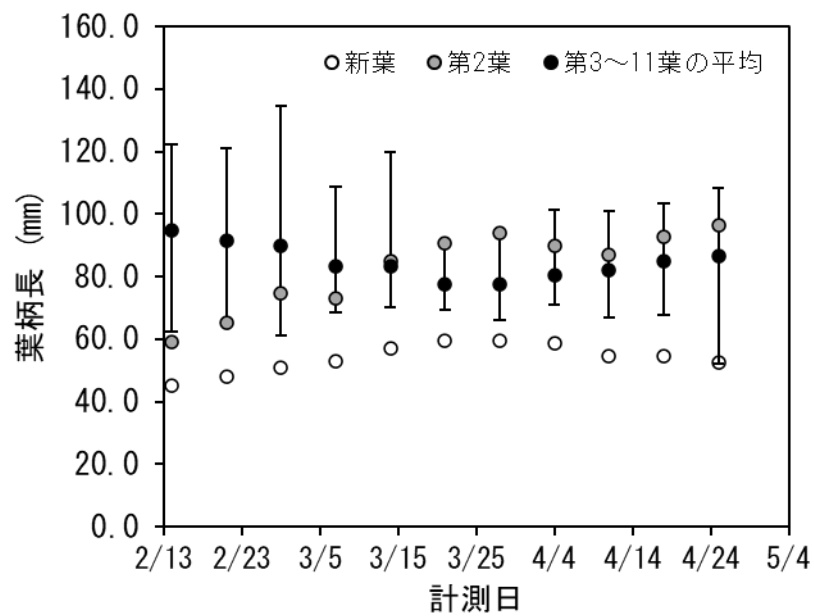
作物条件として葉面積および葉柄長を計測した。観察対象とした 30 株のうち、列の両端の 2 株と中央付近の 2 株を除いた 26 株を対象とし、週に 1 回調査した。計測は第 II 章と同じ方法で行った。

観測期間中の葉位ごとの葉面積の推移を図 VI-5 (a) に示す。総葉面積は、2 月中旬の約 75,000 mm<sup>2</sup> から 3 月中旬には約 60,000 mm<sup>2</sup> まで減少し、その後 4 月中旬には約 70,000 mm<sup>2</sup> まで増加した。3 月以降は、2 枚目から 5 枚目のような新しい葉が、外側に位置する古い葉よりも大きく成長した。

図 VI-5 (b) に葉柄長の推移を示す。伸長が終了する第 3 葉以降はまとめて記載し、平均、最大、最小値で示した。これらの葉については、葉柄長が 2 月中旬の約 95 mm から 3 月中旬には 77 mm まで減少し、4 月中旬には 87 mm まで増加した。葉柄の先端には葉身があるため、葉全体の長さは常に 100 mm を超えており、株間 200 mm の栽培条件下では、葉が隣接する作物個体と一部に重なっていた。



(a) 葉面積



(b) 葉柄長

\*n=26, エラーバーは最大と最小を表す。

図VI-5 葉位ごとの作物形状の推移

### 3. 結果及び考察

#### (1) 作物個体の物体検出モデル

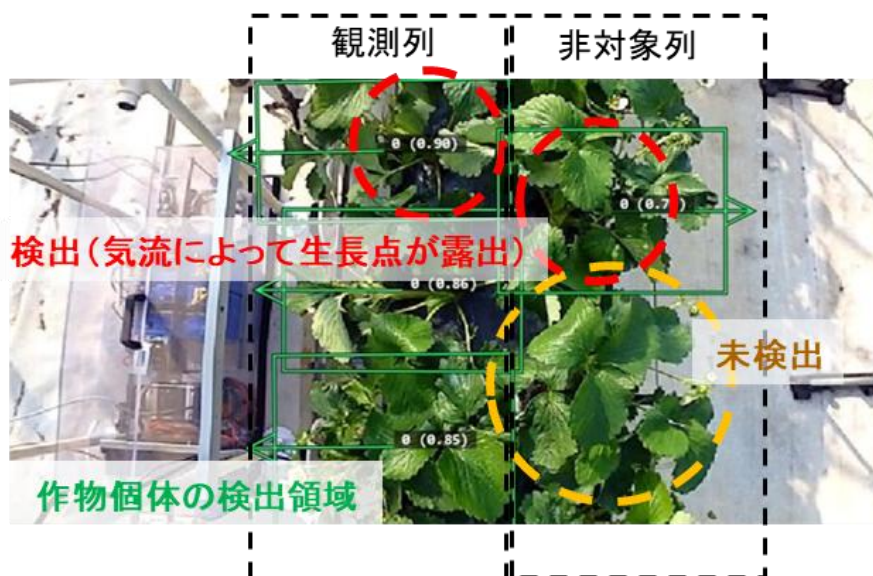
10月～4月の間、毎月1日分の栽培列の観測動画のうち、8割のフレームを用いて検出モデルを作成し、残り2割のフレームで評価を行った結果、再現率は91%、適合率87%であり、F値は89%であった。

同期間中、別の7日間に撮影した686フレームを用いて、モデルの精度を検証した結果、精度、再現率、F値はそれぞれ99%、92%、95%となった（表VI-1）。F値は、定植直後の10月、成長が不良であった2月、及び、害虫の発生によって強い摘葉を行った3、4月には98～99%と高かった。一方、作物が十分に成長し、隣接する作物個体同士の葉が互いに重なり合った11月および12月には、F値は88%と相対的に低くなった。しかし、この場合でもモデル評価時と同等の結果が得られており、構築した作物検出モデルが有効であることが示唆された。

表VI-1 作物個体の物体検出モデルの評価結果

| 年月日        | 適合率 (%) |      |     | 再現率 (%) |      |     | F 値 (%) |      |    |
|------------|---------|------|-----|---------|------|-----|---------|------|----|
|            | 対象列     | 非対称列 | 計   | 対象列     | 非対称列 | 計   | 対象列     | 非対称列 | 計  |
| 2020/10/29 | 100     | 100  | 100 | 97      | 95   | 96  | 99      | 98   | 98 |
| 2020/11/30 | 100     | 97   | 98  | 92      | 69   | 81  | 96      | 81   | 88 |
| 2020/12/27 | 99      | 98   | 98  | 89      | 71   | 80  | 94      | 82   | 88 |
| 2021/1/28  | 100     | 99   | 99  | 94      | 86   | 90  | 97      | 92   | 94 |
| 2021/2/22  | 98      | 99   | 99  | 98      | 97   | 97  | 98      | 98   | 98 |
| 2021/3/25  | 98      | 99   | 98  | 100     | 100  | 100 | 99      | 99   | 99 |
| 2021/4/19  | 98      | 99   | 98  | 100     | 99   | 100 | 99      | 99   | 99 |
| 計          | 99      | 99   | 99  | 96      | 88   | 92  | 97      | 93   | 95 |

この結果には、実験装置直下の観察対象の作物列に加え、千鳥植えの隣接する観測非対象の作物列の結果も含まれている。そこで、対象列と並行する非対象列を比較したところ、適合率はいずれも 99 %であったが、再現率は対象列が 96 %、非対象列が 88 %と、非対象列で低かった。特に、11 月と 12 月の非対象列では再現率が約 70 %と低くなった。この時期は繁茂度合いが高かったのも、気流が十分に作用しない非対象列では、生長点が交差する特徴的な外観（図VI-6）とならない場合が多く発生し、未検出が増加したものと考えられた。このため、物体検出を用いたイチゴの作物個体の検出には、気流を作用させた撮影が有効であると考えられた。



図VI-6 非対称列で未検出であった事例

両列において、再現率より適合率が高かったが、検出された 4,062 個の作物個体のうち、合計 46 件の誤検出があり、そのうち 29 件は果房、17 件は葉が作物個体と誤認されたものであった。これらの誤検出の原因は、複数に分岐した花梗（果房）や葉柄の交差が、気流にさらされた生長点およびその周囲の葉柄と類似した状態となるためと考えられた（図VI-7）。



(a) 複数に分岐した花梗



(b) 葉柄の交差

図VI-7 果房や葉の誤検出例

## (2) 作物個体識別アルゴリズムの精度検証

表VI-2 に作物個体識別アルゴリズムの精度検証の結果を示す。合計 37,800 フレーム、71,647 個体の作物に対し、補完処理なしで 98.94 %が識別された。

表VI-2 作物個体識別アルゴリズムの精度検証結果

| 単位     | 処理<br>個体数 | 未検出  |      |      | 誤検出  |      |      |
|--------|-----------|------|------|------|------|------|------|
|        |           | 合計   | 補完成功 | 補完失敗 | 合計   | 補完成功 | 補完失敗 |
| Number | 71,647    | 304  | 281  | 23   | 461  | 258  | 203  |
| %      | -         | 0.42 | 0.39 | 0.03 | 0.64 | 0.36 | 0.28 |

作物個体の物体検出モデルによって、のべ 304 個 (0.42 %) の作物が未検出であった。そのうち 281 個は、作物間の距離を利用した補完処理により、識別が可能であった (図VI-8 (a))。残る 23 個については、誤検出の影響によるものであった。このため、作物個体識別アルゴリズムとしての未検出率は 0.03 %であった。

また、作物個体の物体検出モデルによって、のべ 461 個 (0.64 %) の作物が誤検出された。これらのうち半数以上にあたる 258 個については、作物列の座標 (x 座標) や作物間の距離の情報から誤検出と判断することができた (図VI-8 (b))。一方で、残りの 203 株についてはこれらの情報から誤検出と判断することができなかった (図VI-8 (c))。このため、最終的な誤検出率は 0.28 %であった。

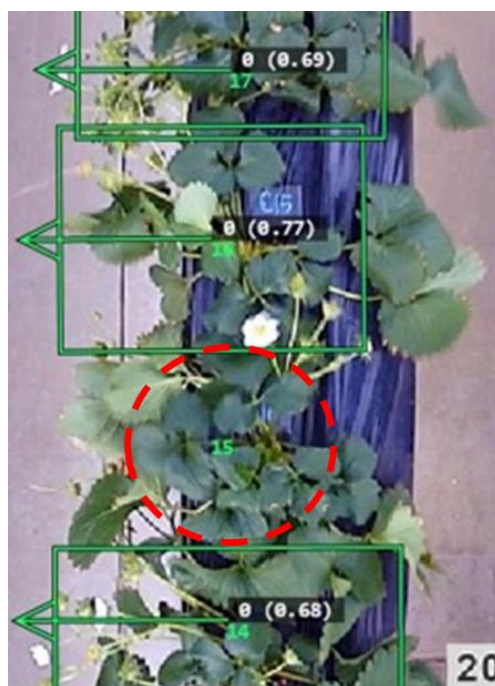
図VI-9 に、誤検出要因の詳細な検討結果を示す。作物個体の物体検出モデルにおいて、果房を誤検出したのは 267 件あり、そのうち半数以上の 63 %で補完処理による誤検出の判断に失敗した。果房は、作物の中央付近の生長点から発生し、伸長しながら通路側に垂れ下がる。この伸長過程において、果房が作物列に近い x 座標に位置するとき、果房周辺のみが作物個体として誤認されるケースが多かった。この傾向は、2月下旬から3月上旬にかけて多かった。

葉の誤検出は 194 件あり、2月中旬から下旬にかけて多く発生した。この時期は外側の古い葉が内側の新しい葉よりも大きく、葉柄も他の期間に比べて長かった。その結果、隣接する作物個体同士の外側の葉の葉柄が交差し、生長点のように見える状況が増加した。しかし、葉の誤検出のうち 82 %は提案したアルゴリズムによって誤検出であると判定できた。これは、外側の葉が長い葉柄同士の交差が、作物列 (x 座標) から離れていることが多いためであり、果房の誤検出よりも判定精度が高くなった。

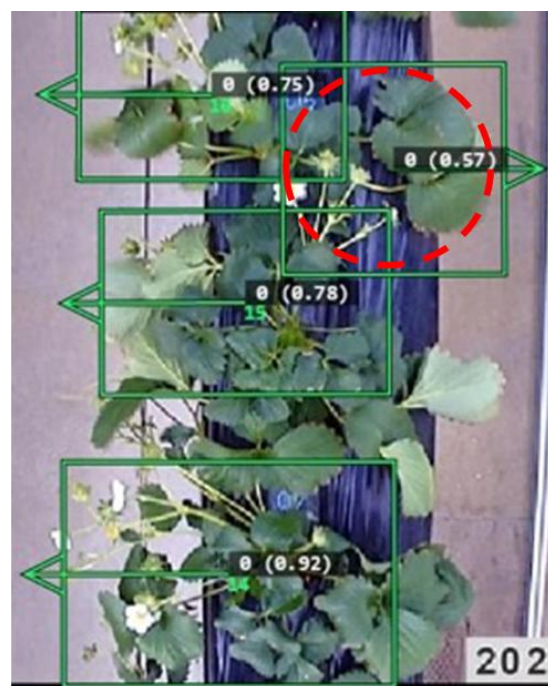
提案した作物個体識別アルゴリズムによって、物体検出モデルの未検出および誤検出領域を補完した結果、作物個体の識別率は 99.69 %となった。さらに、同じ作物を異なる角度から撮影した、連続するフレーム間で、個体 ID を継続的に誤って付与することはなかった(図VI-8 (d))。そのため、各観測日において、正しく個体識別された画像が一度も記録されない作物個体はなかった。

今後、温室内でより多くの作物個体を観測するためには、作物列の識別が必要となる。例えば、作物列の端に列に対応するマーカーを設置して識別を行うか、温室内の端から順に 1 列ずつ観測するのであれば、1 観測列の処理が終了するごとに、観測列番号を加算するなどのフローによって解決可能と考える。

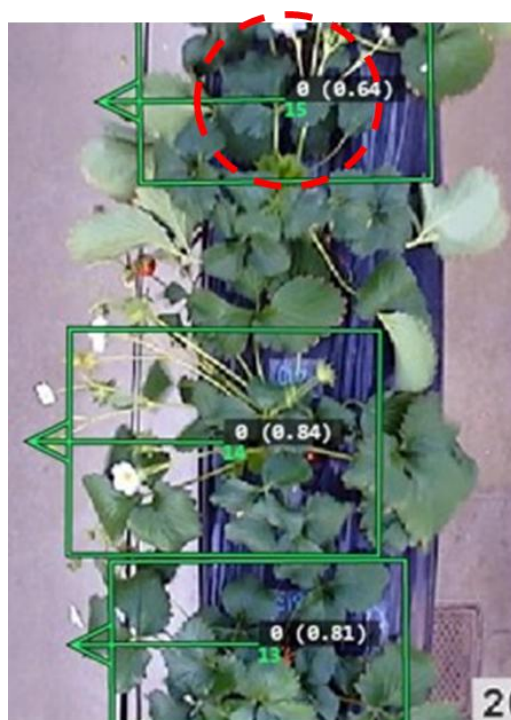
上記の結果から、温室内のイチゴ作物列に沿ってドローンを飛行させ、映像を撮影することで、個々の作物を識別し、それぞれに正確な ID を付与することが可能であることが示された。このような移動観察を経時的に実施することで、作物の生長を追跡することができ、新葉や第 2 葉の経時的な形態変化を画像処理によって省力的かつ定量的に計測する、促成栽培イチゴの生育診断に寄与することができる。



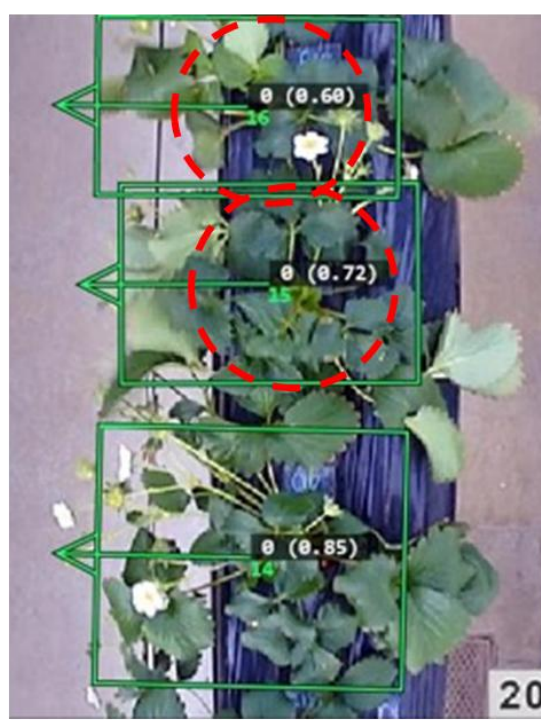
(a) 未検出を判定して補完した例



(b) 誤検出と判定した例

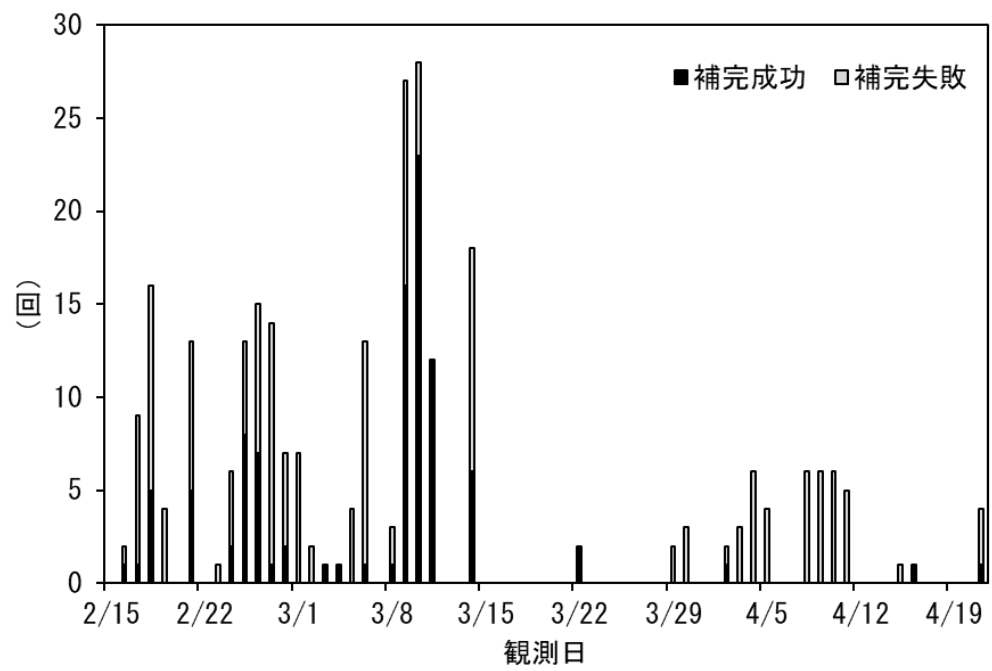


(c) 誤検出と判定できなかった例

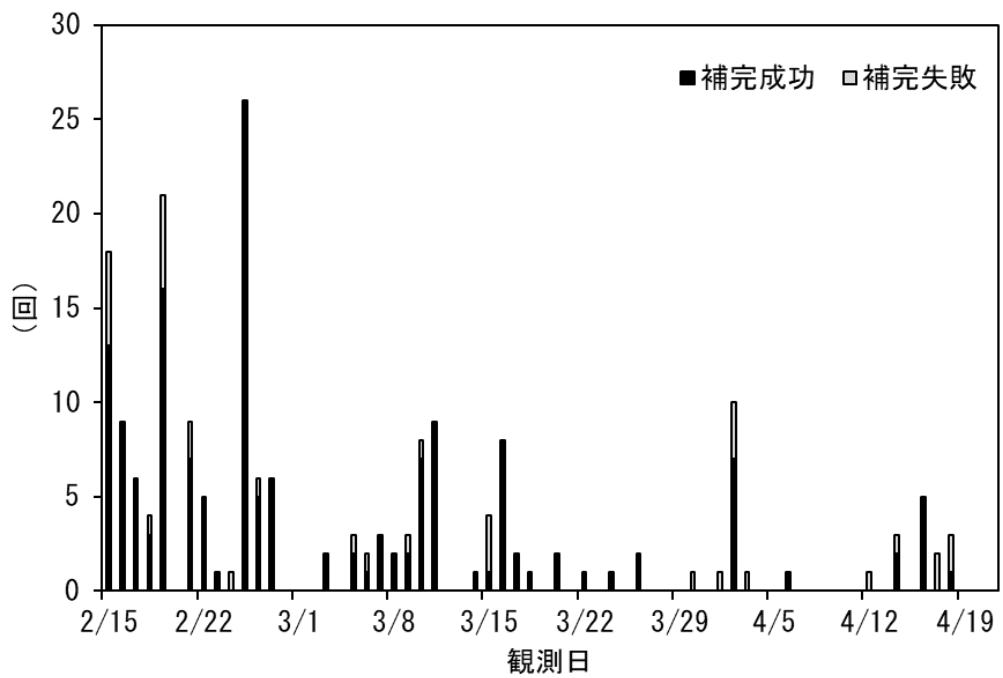


(d) 次フレームで (c) をリカバーした例

図VI-8 作物個体の識別アルゴリズムの処理例



(a) 果房の誤検出



(b) 葉の誤検出

図VI-9 要因別の誤検出の識別結果

#### 4. まとめ

GNSS が安定利用できない温室内において、ドローンを模した実験装置を用いて上方から作物列を移動撮影した映像から、作物個体に位置情報（識別 ID）を付与する画像処理手法を開発した。

まず、作物個体領域を検出するために、深層学習ベースの物体検出モデルを構築した。学習には、10 月から 4 月までの各月に取得したフレームを用い、合計 8,480 枚の作物をアノテーションした。同一期間内の異なる日に撮影した 686 フレームを用いて作物個体の物体検出モデルを評価したところ、全期間を通じて適合率 99 %，再現率 92 %，F 値 95 % と良好なモデルを構築できた。

次に、各フレームで検出された作物個体に一意の ID を付与する作物個体識別アルゴリズムを開発した。開発アルゴリズムでは、移動前後のフレームにおける作物数を比較することで、装置の移動に伴いフレームの視野外に出た作物を判定するとともに、新たに出現した作物には順次 ID を割り当てた。

また、作物個体の物体検出モデルの F 値は良好であったものの、未検出及び誤検出は発生する。このため、フレーム間の作物数の比較の前に、作物間の距離や作物列の座標を利用して未検出や誤検出を補完する処理を組み入れた。2 月中旬から 4 月中旬までの 63 日間、30 株の作物列を毎日観測した映像を用いて評価した結果、未検出率および誤検出率はそれぞれ 0.42 %，0.64 % であったが、補完後はそれぞれ 0.03 %，0.28 % まで低減した。さらに、連続するフレーム間で ID の割り当てに失敗し続けることはなく、正確な識別が可能であった。

## VII 結論

施設園芸では、生産性向上を目指して、生体情報の計測研究が活発に取り組まれているものの、未だ生産現場に広く普及するに至っていない。本研究では、近年、作付面積や収量が減少している一方で、海外需要が高まり、輸出の拡大が目指されているイチゴを対象に、その原因を検討し、省力的な生体計測手法について研究した。

以下に、各章で得られた結論を総括し、本論文の結論とする。

第Ⅱ章では、一季なり品種に特有な生理状態（休眠）の変化を含む、低温期に地上部の生育が抑制される現象を評価できる指標を明らかにした。気温の異なる3つの試験区で生育を調査、比較した結果、新葉から第3葉の生体情報に生理状態によると考えられる違いがあった。生産現場で用いられる第3葉の葉柄長は生育抑制の様子をよく表していたが、第2葉の葉柄長や葉面積などを経時計測することで生育抑制の状態変化をさらに早く捉えられることが明らかになった。一方、生長が旺盛な新葉の葉柄長や葉面積では変動が大きく指標としては不適であった。これは、調査が1週間間隔と長かったためで、高頻度な計測により、時間間隔を含む生長量として利用できれば、第2葉よりも生育抑制の状態変化を早く捉えられると考えられた。これらの結果から、イチゴの促成栽培においては、新葉や第2葉といった若葉の葉面積や葉柄長をできる限り高頻度に経時計測することが重要であることが明らかとなった。また、これらの指標は、わずか3℃程度と、同一温室内で容易に起こり得る気温差でも違いが見られた。このことから、温室内のできる限り多くの株の生体情報を観測することも重要と考えられた。

第Ⅲ章では、通常は生長した葉の死角に隠れている若葉を、気流で露出させて画像観測することを想定し、利用可能な風速範囲を考察するための葉の物理特性を調べた。まず、風洞実験で葉身の抗力係数が風速の増加に伴い漸減することを明らかにし、風荷重を風速と葉面積で表現した。つぎに、物理特性として求めた葉柄の曲げ応力は、第3葉で44 MPaに対して、その他の葉では32 MPaであり、生長の過程で強まり、劣化の過程で弱まると考えられた。ヤング率は、新葉、第2葉、第3葉以降でそれぞれ89, 194, 297 MPaと古い葉ほど高く、座屈に対する強度が高かった。また、株元が損傷する曲げモーメントは、葉柄断面積に比

例することを明らかにした。葉が受ける風荷重、葉柄の物理特性、及び、イチゴの葉面積等の一般的な形状から、葉柄が損傷する風速を検討したところ、第2葉が座屈によって損傷するリスクが最も高く、葉柄が損傷しない風速のしきい値 10 m /s 程度と試算した。

第IV章では、イチゴの株の上方から気流を加えて、生長点を露出させるのに必要な気流の強さを調べた。風洞実験の結果、風速 6 m/s で 19 株中 18 株の生長点を露出させることができ、一定時間の露出頻度を算出すると、89 %であった。このとき、第1～3葉は水平投影距離にして 30～40 mm 程度、株の中心から外側へ移動しており、気流によって生長点周辺から葉を除けることができた。また、葉が動いて生じた生長点付近の隙間領域は、ほとんど葉が動いていない風速 0.8 m/s の 25 %から、風速 6.0 m/s では 62 %と 2.5 倍程度広がり、生育診断指標となる若葉の葉柄や、葉柄が短い若葉の葉身を画像認識するための条件も向上した。新葉や第2葉が着葉する生長点周辺を露出するのに必要十分な風速は 6 m/s と葉柄を損傷する 10 m/s 未満であったことから、株の上方から気流を加えることによって損傷を生じさせることなく、若葉の観測が可能であることが明らかとなった。

第V章では、若葉を露出するための気流を作用する手段として、ドローン（クアドコプタ）のダウンウォッシュの活用について検討した。まず、ドローンの模擬実験装置を作成し、ダウンウォッシュの空間分布を計測した。その結果、気流は四つのプロペラの内側に集約し、風洞のように円筒状に流れていることが分かった。また、その気流は、プロペラからの距離に比例して減衰していることが分かった。このため、第IV章で検討した風洞実験の結果を適用できるものと考えられた。次に、ドローンが作物列に倣って移動観測することを想定し、作物列に対する気流の作用位置が生長点の露出に及ぼす影響を調べた。気流の作用位置による生長点の露出頻度は、千鳥植えの栽培列の中央、栽培列の端面、端面から通路上と比較して、作物列の直上が 76%と最適であった。また、移動観測では定点観測より撮影アングルが広がることで、倒れにくい新葉の死角にある生長点も撮影が可能であり、作物上を通過する間に必ず生長点が露出するタイミングが存在した。以上より、ドローンの作物列上の移動観測によって、省力的に多く株の若葉の観測が可能であることを明らかにした。

第VI章では、GNSS が安定利用できない温室内において、ドローンが作物列を空撮することを想定し、移動撮影された作物列の映像から作物個体を識別する画像処理手法を開発した。まず、深層学習による作物個体の物体検出モデルを構築するため、8,480 枚の作物の画像を用いて学習したところ、F 値 95 %、適合率 99 %、再現率 92 %と良好な精度を得た。次に、検出された作物に一意の ID を付与する処理アルゴリズムを開発した。開発アルゴリズムは、移動前後のフレーム間における作物個体数の差に基づき、作物個体のフレームイン・アウトを識別することを基本とする。ここに、物体検出の未検出や誤検出を補完するため、作物間距離や列座標を利用する処理を追加した。63 日間の観測による精度検証の結果、のべ 71,647 の作物個体に対して 99.7 %の確立で識別に成功した。さらに、連続するフレーム間で ID の割り当てに失敗し続けることはなく、正確な識別が可能であった。

今後は、GNSS を利用しないドローンの飛行によって観測を行うとともに、本手法で記録される、ID 付の作物個体単位の画像を時系列で比較する画像処理手法を開発することにより、葉の発生頻度や若葉の葉面積の経時変化などを省力的に定量化する技術を開発する予定である。

最後に、本開発手法が、我が国のイチゴ生産の単収の向上など、生産性の向上につながり、イチゴ産業を活性化する一助となることを期待している。

## 参考文献

- Afonso M., Fonteijn H., Fiorentin F. S., Lensink D., Mooij M., Faber N., Polder G., Wehrens R., 2020. Tomato Fruit Detection and Counting in Greenhouses Using Deep Learning. *Frontiers in Plant Science*. 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.571299>. Accessed Nov. 25, 2025.
- 張洪基, 青木弘行, 福山寿雄, 逸見彰男, 橋本康, 1996. 養液栽培での生育に伴うメロン果実の表面積と体積変化の自動計測および養分吸収との関係. *植物工場学会誌*. 8 : 99-103.
- Darrow, G.M., Waldo G.F., 1933. Photoperiodism as a cause of the rest period in strawberries. *Science*. 77 : 353-354.
- 江口庸雄, 1932. 苺の花芽分化発育様式に就いて (第 3 報). *園芸学会雑誌*. 3 (1) : 21-31.
- 愛媛県農林水産研究所, 2010. あまおとめの栽培指針. [https:// www.pref.ehime.jp/h35500/documents/amaotome\\_manual\\_all.pdf](https://www.pref.ehime.jp/h35500/documents/amaotome_manual_all.pdf). Accessed Jun 2, 2019. 5.
- 遠藤 (飛川) みのり, 曾根 一純, 大石 高也, 小林 俊裕, 松下 孝一, 文 美玲, 佐藤 優介, 田中 慎司, 2020. 香港への輸出において船舶・航空複合一貫輸送が九州産イチゴ‘恋みのり’の果実品質に及ぼす影響. *植物環境工学*. 32(2) : 122-131.
- Viveros Escamilla L. D., Gómez-Espinosa A., Escobedo Cabello J. A. and Cantoral-Ceballos J. A., 2024. Maturity Recognition and Fruit Counting for Sweet Peppers in Greenhouses Using Deep Learning Neural Networks. *Agriculture*. 14(3) : 331. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030331>. Accessed Nov. 25, 2025.
- Fadami M., Rath T., 2021. Investigations on usage of multicopters in greenhouses for plant monitoring and its possible side effects. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 14 (4): 122-131.
- 藤田 穰, 2014. 株式会社 IHI. 自動収穫装置. 特許第 5494183 号.
- 古野裕子, 松井正実, 井上英二, 森 健, 岡安崇史, 2006. 選別風を受ける藁の飛散範囲シミュレーション. *農業機械学会誌*. 68(3) : 46-51.
- Guo, W., Fukano Y., Noshita K., Ninomiya S., 2020. Field-based individual plant phenotyping of herbaceous species by unmanned aerial vehicle.

- Ecology and Evolution. 10 (21): 12318-12326.
- Gang M-S., Kim H.-J. and Kim D-W., 2022. Estimation of Greenhouse Lettuce Growth Indices Based on a Two-Stage CNN Using RGB-D Images. Sensors. 22(15) ; 5499. <https://doi.org/10.3390/s22155499>. Accessed Nov. 25, 2025.
- 浜本 浩, 黒崎 秀仁, 岩崎 泰永, 2015. Kinect (キネクト) の深度情報を利用した作物個体群の受光態勢の評価. 植物環境工学. 27(2) : 97-101.
- 橋本 康, 高山弘太朗, 野並 浩, 2012. 植物生体情報の計測及びシステム制御への応用. 野口 伸, 橋本 康, 村瀬治比古編, 太陽光利用型植物工場の新展開. 養賢堂, 東京. 32-67.
- 林真紀夫, 2015. 施設内環境の特性と制御. 日本施設園芸協会編, 施設園芸・植物工場ハンドブック. 農山漁村文化協会, 東京, 96-98.
- Hayashi S., Yamamoto S., Tsubota S., Kobayashi K., Kamata J., Peter R., Yamamoto K., 2017. Development and practical application of stationary strawberry-harvesting robot integrated with movable bench system, Nogyo-shokuryo kougakkaishi. 79(5) : 415-425.
- Hiraguri T., Shimizu H., Kimura T., Matsuda T., Maruta K., Takemura Y., Ohya T., Takanashi T., 2023. Autonomous drone-based pollination system using AI classifier to replace bees for greenhouse tomato cultivation. IEEE Access. 11: 99352-99364.
- 星 岳彦, 瀧口 武, 1995. ビデオカメラを用いたハウレンソウ葉の運動の連続計測. 農業気象. 51(2) : 123-130.
- 星岳彦, 2019. 施設園芸生産におけるスマート化の展開. 農業情報学会創立 30 周年記念シンポジウム.
- Ishii A., Yasuno T., Amakata M., Sugawara H., Fujii J., Ozawa K., 2020. Autonomous UAV flight using the total station navigation system in non-GNSS environments. Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 685-692.
- 石田和義, 出口陽平, 岡田勝蔵, 2003. 機械的刺激による植物の短期生育に関する基礎研究 (第 1 報). 精密工学会誌. 69(12) ; 1780-1784.
- 石井 徹, 戸井田秀基, 近藤 直, 田原直行, 2003. 落葉系果実選別ロボット (第 1 報). 農業機械学会誌. 65(6) ; 163- 172.
- 石川 仁, 2005. 樹木の流体力学特性の実験的解明. ながれ. 24 : 483—490.

- 岩崎泰永, 2015. 生体情報計測. 日本施設園芸協会編, 施設園芸・植物工場ハンドブック. 農山漁村文化協会, 東京, 360-367.
- 神山健二, 大橋征幹, 成田健一, 2004. 葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験. 日本建築学会環境系論文集. 578 : 71-77.
- 兼田朋子, 中村宣貴, 安永円理子, 志水基修, 馬場 正, 福田文夫, 中野龍平, 2021. イチゴの東南アジア向け海上輸出実現に向けた輸送環境および位装による品質保持効果. 日本食品保蔵科学会誌. 47 (5) : 221-231.
- 加納多佳留, 高山弘太郎, 海野博也, 戸田清太郎, 高橋憲子, 仁科弘重, 2019. つり下げ型植物生体画像情報計測ロボットの開発. 日本生物環境工学会 2019 年千葉大会講演要旨, 千葉, 132-133.
- 柏寄 勝, 2024. 日本のおいしいイチゴを世界に届けるために—おいしいという価値の共有化を如何に図るか. 美味技術学会誌. 23(1) : 59-61.
- 川上昭太郎, 坂口栄一郎, 2010. 破壊測定によるバラ切り花の茎の曲げ特性と水分の関係. 農業生産技術管理学会誌. 17(3) : 79-83.
- 川嶋浩樹, 2015. 被覆資材の機能と特性. 日本施設園芸協会編, 施設園芸・植物工場ハンドブック. 農山漁村文化協会, 東京, 56-64.
- 菊池慶仁, 阿部太智, 2019. AR マーカーに基づくドローンの自律飛行 (第二報). 北海学園大学大学院工学研究科紀要. 19 : 17-22.
- 黒崎 秀仁, 梅田 大樹, 岩崎 泰永, 2017. Kinect を用いたパプリカの草高計測と成長解析への適用. 植物環境工学. 29(4) : 130-138.
- 李 炳駟, 高橋和彦, 杉山直儀, 1968. イチゴの休眠に関する研究 (第 1 報). 園芸学会雑誌. 37 (2) : 35-40.
- 李 炳駟, 高橋和彦, 杉山直儀, 1970. イチゴの休眠に関する研究 (第 2 報). 園芸学会雑誌. 39 (3) : 26-32.
- 町田輝史, 1989. 図解材料強さ学の学び方 (第 1 版). オーム社, 東京, 192-203.
- Matsui M., Inoue E., Kuwano T., Mori K., 2004. Study on the flying paddy acting the cleaning wind (Part 1). Japanese Society of Agricultural Machinery. 66 (1) : 43-48.
- Mayhead, G. J., 1973. Some drag coefficients for British forest tree derived from wind tunnel studies. Agricultural Meteorology. 12 ; 123-130.
- 森下昌三, 2014a. 栽培イチゴの誕生と我が国への伝来. イチゴの基礎知識.

- 誠文堂新光社，東京，11-14.
- 森下昌三，2014b. 作型開発と生産量. イチゴの基礎知識. 誠文堂新光社，東京，15-26.
- 森下昌三，2014c. 休眠. イチゴの基礎知識生態と栽培技術. 誠文堂新光社，東京，80-92，151-198.
- Naito H., Fukatsu T., Shimomoto K., Hosoi F. and Ota T., 2025. Leaf Area Estimation in High-Wire Tomato Cultivation Using Plant Body Scanning. *AgriEngineering*. 7(7) : 206.  
<https://doi.org/10.3390/agriengineering7070206>. Accessed Nov. 25, 2025.
- 中山夏希，山下貴史，重松健太，吉永慶太，小林 研，窪田陽介，星典宏，2016. 携帯型植物水分情報測定装置の開発. 農業食料工学会誌. 78(1) ; 73-79.
- Ndikumana J. N., Lee U., Yoo J.H., Yeboah S., Park S. H., Lee T. S., Yeoung Y. R., Kim H. S., 2024. Development of a deep-learning phenotyping tool for analyzing image-based strawberry phenotypes. *Frontiers in Plant Science*. 15.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1418383>. Accessed Nov. 25, 2025.
- 西卓郎，近藤直，毛利健太郎，1997. キュウリの画像認識に関する研究(第2報)一本葉の葉位と個体の認識 . 農業機械学会誌. 59(6) : 65-73.
- 西沢 隆，堀裕，1989. イチゴの栄養生長期から休眠期にかけて の光合成と光合成産物の転流・分配. 園芸学会雑誌. 57 (4) : 633-641.
- Njane S. N., Tsuda S., Sugiura R., Katayama K., Goto K., Tsuchiya S., Tsuji H., 2023. Phenotyping system for precise monitoring of potato crops during growth. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 16 (1) : 24-36.
- 農林水産省，2013. 「攻めの農林水産業」の実現に向けて.  
[https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/H26/pdf/140529\\_07.pdf](https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/H26/pdf/140529_07.pdf). Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省，2019. 特集1 いちご. aff.  
[https://www.maff.go.jp/j/pr/aff/1912/spe1\\_01.html](https://www.maff.go.jp/j/pr/aff/1912/spe1_01.html).  
 Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省，2020. 養液栽培実面積の推移（野菜）.

- [https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/setti\\_matome.html](https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/setti_matome.html).  
1.  
Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省, 2022a. 園芸用施設の設置等の状況.  
[https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/haipura/setti\\_4.html](https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/haipura/setti_4.html). Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省, 2022b. 生産農業所得統計. [https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500206&tstat=000001015617&cycle=7&tclass1=000001019794&tclass2=000001215200&cycle\\_facet=tclass1%3Atclass2&tclass3val=0](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500206&tstat=000001015617&cycle=7&tclass1=000001019794&tclass2=000001215200&cycle_facet=tclass1%3Atclass2&tclass3val=0). Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省, 2023a. 省エネルギー装置等の普及の推移.  
[https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/setti\\_matome.html](https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/setti_matome.html). Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省, 2023b. 農林水産物・食品に関する統計情報.  
[https://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/e\\_info/zisseki.html](https://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/e_info/zisseki.html).  
Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省, 2024. 施設園芸をめぐる情勢.  
<https://www.maff.go.jp/tohoku/seisan/sisetsu/attach/pdf/index-3.pdf>.  
Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省, 2025a. 作物統計調査.  
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=0&year=20230&month=0&tclass1=000001032286&tclass2=000001037845>. Accessed Nov. 25, 2025.
- 農林水産省, 2025b. 農林水産物・食品の輸出拡大実行戦略 ～輸出拡大等による「海外から稼ぐ力」の強化～.  
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/progress/attach/pdf/index-43.pdf>. Accessed Nov. 25, 2025.
- 岡島孝雄, 1980. 不静定構造力学の解法 (第 17 版). 理工学社, 東京, 1-2-1-3.
- 沖村誠, 2012. イチゴ品種の動向. 農文協編, イチゴ大事典. 農山漁村文化協会, 東京, 299-303.
- Shimomoto, K. Naito H., Fukatsu T., Ota T., 2025. Development of an

- AI-based fruit monitoring system with a focus illumination unit for tomatoes grown in greenhouse horticulture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 18 (1): 23-31.
- 庄野 浩資, 佐瀬 勘紀, 1996. トマト作物体を対象とした葉傾斜角と概略的形狀の3次元画像計測. *生物環境調節*. 34(1) : 75-85.
- Sugiura R., Tsuda S., Tamiya S., Itoh A., Nishiwaki K., Murakami N., Shibuya Y., Hirafuji M., Nuske S., 2016. Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle. *Biosystem Engineering*. 148 : 1-10.
- 杉浦綾, 2021, 推定装置, 推定方法, 及びプログラム, 特開 2021-189749.
- 鈴木正肚, 小林 研, 猪之奥康治, 三浦恭志郎, 平田孝三, 1995. ウリ科野菜用接ぎ木装置の開発 (第1報). *農業機械学会誌*. 57(2) ; 67-76.
- 鈴木智, 2017. 非GPS環境における小型無人航空機の自律制御. *計測と制御*. 56(1) : 18-23.
- Takahashi M., Takayama S., Umeda H., Yoshida C., Koike O., Iwasaki Y., Sugeno W., 2020. Quantification of Strawberry Plant Growth and Amount of Light Received Using a Depth Sensor. *Environment Control in Biology* : 58(2), 31-36.
- 高山弘太郎, 仁科弘重, 山本展寛, 羽藤堅治, 有馬誠一, 2009. デジタルカメラを用いた投影面積モニタリングによるトマトの水ストレスの早期診断. *植物環境工学*. 21(2) : 59-64.
- 高山弘太郎, 2023. AIを活用した“スマホでイチゴの生育調査ウェブアプリ”. *農業食料工学会誌*. 85(4) : 197-201.
- 竹内 隆, 1997. イチゴの花房連続出蕾に関与する生育特性の解明と品種間差異. *静岡県農業試験場研究報告*. 42 : 39-50.
- 田中 美咲, 濱 侃, 鶴崎 幸, 柴戸 靖志, 2021. キャベツほ場の生育を株単位で把握するためのドローン空撮方法と画像解析手法. *日本リモートセンシング学会誌*. 42(3) : 375-385.
- Timprae W., Sagawa T., Baar S., Kondo S., Okada Y., Sato K., Rumahorbo P. S., Lyu Y., Shibuya K., Gama Y., Hatanaka Y. and Watanabe S., 2025. Tomato Growth Monitoring and Phenological Analysis Using Deep Learning-Based Instance Segmentation and 3D Point Cloud

- Reconstruction. Sustainability. 17(22) : 10120.  
<https://doi.org/10.3390/su172210120>. Accessed Nov. 25, 2025.
- 栃木県, 2021. とちおとめ.  
<https://www.pref.tochigi.lg.jp/g61/hinsyu/tochiotome.html>.  
 Accessed Nov. 25, 2025.
- 栃木県農業試験場, 2001. 新技術シリーズ No.3 イチゴ「とちおとめ」の栽培技術. <http://www.pref.tochigi.lg.jp/g61/seika/documents/singi03.pdf>. Accessed Jun 2, 2019.
- 坪田 将吾, 山本聡史, 手島司, 林茂彦, 2015. イチゴの循環式移動栽培における果実計数手法の開発. 植物環境工学. 27(3) : 152-161.
- 坪田 将吾, 手島司, 山本聡史, 林茂彦, 2016. 循環式移動栽培におけるイチゴの果実径推定手法. 植物環境工学. 28(4) : 172-181.
- 坪田将吾, 西川純, 2023. イチゴの生体観測用ライントレースドローンの開発. 農業環境工学関連学会 2023 年合同大会講演要旨. 69.
- 上加裕子, 松井正実, 青柳悠也, 三浦 泰, 2019. 別風を受けるソバの空気力学特性. 農業食料工学会誌. 81(4) ; 243- 249.
- 植木正明, 1993. イチゴ女峰の夜冷短日処理における処理開始時期の影響. 栃木県農業試験場研究報告. 40 : 75-82.
- 植松徳雄, 1998. イチゴ栽培の理論と実際. 誠文堂新光社, 東京, 254-263, 275-284.
- Umeda H., Mochizuki Y., Saito T., Higashide T., Iwasaki Y., 2018. Diagnosing method for plant growth using a 3D depth sensor. Acta Horticulturae. 1227: 631-636.
- Yamamoto S., Hayashi S., Tsubota S., 2015. Growth measurement of a community of strawberries using three-dimensional sensor. Environment Control in Biology, 53 : 49-53.
- Yamamoto S., Madokoro H., Nishimura Y., Yaji Y., 2020. Onion bulb counting in a large-scale field using a drone with real-time kinematic global navigation satellite system. Engineering in Agriculture, Environment and Food. 13 (1): 9-14.
- 山崎祐一, 1996. 株式会社クボタ. 果菜類の収穫対象部検出装置. 特開平 8-103139.
- 柳 智博, 2012. 最新農業技術野菜 Vol. 5. 農山漁村文化協会編. 農山漁村文

化協会，東京，7-20.

Yanagishita H., 2018. NILEWORKS INC. JAPAN. Drone for capturing images of field crops. WO 2018/168565 A1.

Yang, M.-D., Hsu Y.-C., Chen Y.-H. Yang C.-Y., Li K.-Y., 2025. Precision monitoring of rice nitrogen fertilizer levels based on machine learning and UAV multispectral imagery. Computers and Electronics in Agriculture. 237 : 110523.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110523>. Accessed Nov. 25, 2025.

## 本論文に関する著者の参考論文

### 第Ⅱ章

坪田将吾，難波和彦，岩崎泰永，深津時広，内藤裕貴，太田智彦，2020. 促成栽培イチゴの生育診断に資する生体計測手法—低温期の生育抑制を評価する生体指標—，農業食料工学会誌，82(6)，593-600.

### 第Ⅲ章

坪田将吾，難波和彦，深津時広，内藤裕貴，山田哲資，太田智彦，2022. 促成栽培イチゴの生育診断に資する生体計測手法—若葉観測に利用可能な気流強度—，農業食料工学会誌，84(4)，229-237.

### 第Ⅳ章及び第Ⅴ章

坪田将吾，難波和彦，深津時広，2022. 促成栽培イチゴの生育診断に資する生体計測手法—生長点の露出に必要な気流条件の検討—，農業食料工学会誌，84(5)，321-331.

### 第Ⅵ章

Shogo TSUBOTA, Kazuhiko NAMBA, Shota KASEI, Tokihiro FUKATSU,  
Biosensing method of growth diagnosis in the forced culture of  
strawberries—Development of crop-identification algorithms—,  
Engineering in Agriculture, Environment and Food, in press.

## 謝辞

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域の難波和彦准教授には、本研究の遂行及び取りまとめに当たり、全般にわたって丁寧なご指導とご校閲を賜りました。心より感謝申し上げます。

本論文の審査に際して、有益なご助言とご指導をいただきました、岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域の門田充司教授、安場健一郎教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の立案時より、研究環境を整えていただき、全般にわたって有益なご助言とご指導をいただきました農研機構農業機械研究部門の深津時広博士に心より感謝申し上げます。

イチゴの生育診断指標の検討について、有益なご助言とご指導をいただきました農研機構野菜花き研究部門の岩崎泰永教授（現明治大学）に心より感謝申し上げます。

また、栽培実験や作物調査にあたっては、岡山大学農学部の茨木昭年氏、勝部史也氏、農研機構農業機械研究部門の棚橋香織氏、池田かおる氏、高田千佳氏にご尽力をいただきました。深く感謝いたします。

農研機構農業機械研究部門の嘉瀬井祥太氏、岡山大学農学部の徳留英明氏には、深層学習のデータセット作成にご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。

本研究遂行時に在籍した農研機構農業技術革新工学研究センターにおいては、所属ユニットの太田智彦博士、内藤裕貴博士（現東京大学）、山田哲資氏に有益なご助言をいただきました。御礼申し上げます。

現所属である農研機構農業機械研究部門の吉田隆延博士、吉永慶太博士、西川純博士、関隼人博士、坂田遼太氏には、本研究の遂行と本論文のとりまとめに専念する環境を作っていただきました。感謝申し上げます。

また、研究遂行上、農研機構の様々な職種の皆様に日々ご助力をいただきました。御礼申し上げます。

最後に、日頃より研究業務に対する理解と協力を惜しまず、いつも笑顔で支えてくれる家族に感謝いたします。