

3 実験結果

3-1 曲げ試験結果

図4に曲げ強さ、図5に曲げ弾性率を示す。これらの結果より、90°方向よりも0°方向の試験片の方が弾性率は高くなった。また、曲げ強さの数値は、0°方向試験片の方が平均的に高い結果となった。これらのことから弾性率が高いほうが曲げ試験において強度が高くなると分かる。

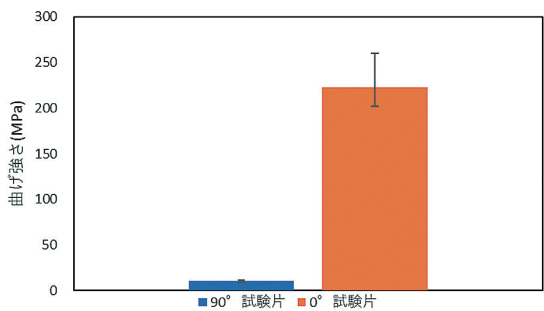


図4 曲げ強さ

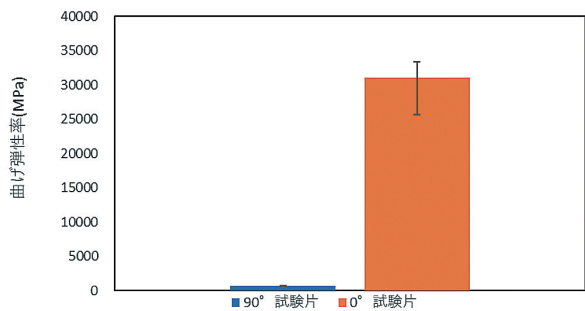


図5 曲げ弾性率

3-2 引張試験結果

図6に引張強さ、図7に破断ひずみを示す。これらの結果より引張試験の場合、0°方向試験片の方が90°方向試験片に比べて引張強さと破断ひずみが大きい結果となった。

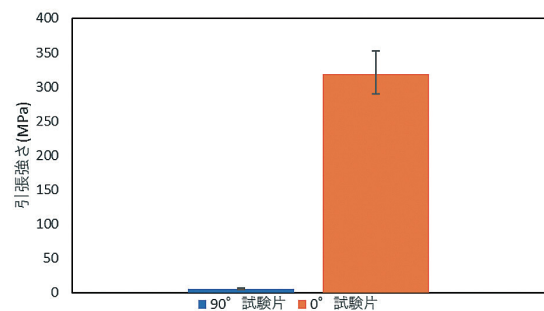


図6 引張強さ

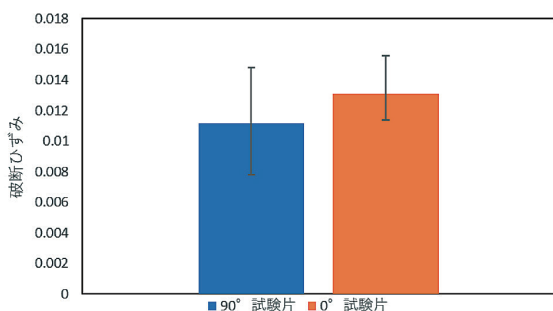


図7 破断ひずみ

3-3 トポロジー解析

次にトポロジー最適化の解析結果を図8、3Dプリンターで成形したボディを図9に示す。

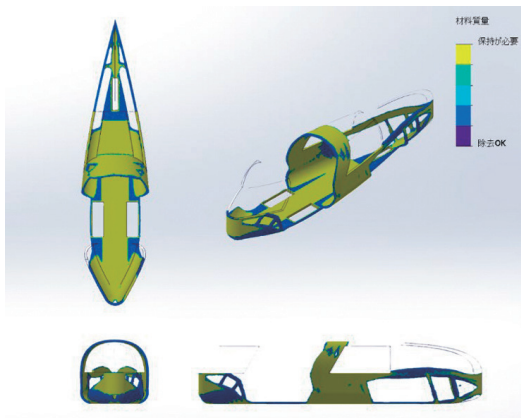


図8 トポロジー最適化の解析結果

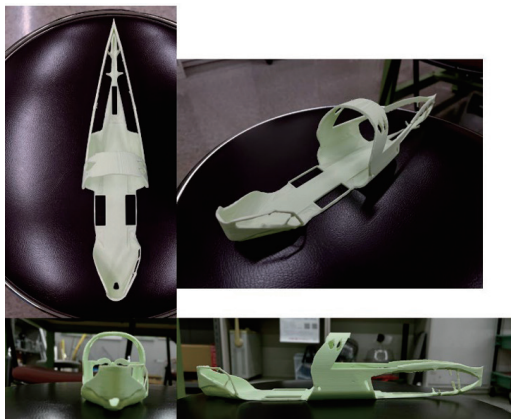


図9 3Dプリンターで成形したボディ

4 考察

曲げ試験では、試験片の上部では圧縮応力、下部では引張応力が働いている。0°方向試験片は90°方向試験片に比べて、弾性率が高く破壊時の荷重の平均値も高いことが分かった。これは、0°方向試験片では、繊維方向と応力の方向が一緒なので繊維が荷重を効率よく負担し90°方向試験片では樹脂や強化繊維でしか応力を負担できないからだと考えられる。またこれらのことから、0°方向の試験片の方が曲げ試験のような力が実際に働いた際に材料本来の力が発揮できると考えられる。

引張試験において0°方向試験片と90°方向試験片の様子を比較すると90°方向試験片の方がきれいな壊れ方をしていることが分かった。このことから0°方向の試験片の場合は試験力の方向と繊維方向が同じであり、繊維が荷重に対して直接負担するためひずみが大きく、90°方向試験片の場合は、試験力の方向と繊維方向が異なり、繊維が荷重を支えきれないため引張強さが小さくなったと考えられる。またこのことから実際に引張試験のような試験力が母材に働いた場合、0°方向試験片の方が材料本来の強度、剛性が発揮できると考えられる。

5 結言

引張試験と曲げ試験の実験結果を通して0°方向の試験片の方が材料本来の強度、剛性が発揮できるということが分かった。



REPORT

2

寒冷地におけるレモン栽培の実現可能性と植物生体電位を用いた植物ヘルスマニタリング

米津レモン

1年 深澤 響希 (山梨県／巨摩高校出身)
皆川 稜太 (秋田県／横手清陵学院高校出身)
荘司 隼人 (秋田県／由利高校出身)
中井祐太郎 (宮城県／仙台南高校出身)

システム科学技術学部 知能メカトロニクス学科

指導教員 古川 大介 助教
(知能メカトロニクス学科)

Q1 取り組んだ学生自主研究について教えてください。

秋田県は冬季に気温が低く日照時間や光量が不足するため、レモン栽培には厳しい環境です。しかし、寒冷地でのレモン栽培が実現すれば、新たな特産品として期待できます。私たちは、植物の生理活動に伴って発生する植物生体電位に着目し、光量変化による応答特性から健康状態(バイタル)を評価しました。結果、低温環境下でも光合成活動の維持と光量による応答特性の違いを確認し、環境制御型レモン栽培への基礎的知見を得ました。



Q2 学生自主研究で得たことや良かったことを教えてください。

自主研究を通して、植物生体電位の計測技術やデータのノイズ処理、グラフ化の重要性を学びました。実験条件の設定やデータ分析を行う中で、仲間と相談しながら課題を発見し、解決する力を養うことができたと思います。さらに、寒冷地におけるレモン栽培という地域課題を科学的根拠に基づいて考察する重要性を学び、自ら得たデータから植物の状態を評価できたことに大きな達成感を得ることができ、研究意欲が高まりました。



高校生へのメッセージ

Message from seniors

秋田県立大学の魅力は、1年生から本格的な研究に取り組める環境と、仲間と協力しながら成長できる雰囲気です。講義だけでは学べない部分まで自分の手で確かめられることが楽しく、研究を通して学ぶことの面白さを実感できます。また、先生方や先輩方のサポートが手厚く、わからないことも気軽に相談できる環境が整っています。ぜひ入学したら、自分の興味を形にして、仲間と一緒に新しい発見を楽しんでください！



研究内容

お肌の老化を“見える化”する研究

紫外線を浴びることによって生じる「光老化」は、お肌のコラーゲンやエラスチンが変性または減少し、その結果、皮膚の弾力や剛性が低下し、“シワ”や“たるみ”の原因となります。その他にも、褥瘡(じょくそう)やスキンテア(皮膚が裂ける傷)などの皮膚トラブルも、皮膚内部(真皮)の力学的変化が関与していると考えられています。私たちの研究では、これらの皮膚トラブルの発生メカニズムを明らかにし、将来的にシワ発生リスクの評価法を構築することを目指しています。そのために、“光干渉断層画像法”を用いて、皮膚内部構造を傷つけずに可視化し、さらに皮膚を軽く吸引した際の変形から、皮膚内部の力学的性質を推定する方法を開発しています。この研究によって、シワなどの皮膚トラブルを早期に予測や予防への応用が期待できます。他にも、生産工程で生じる問題に対し、AIを利用した研究にも取り組んでいます。

高校生へのメッセージ

「真剣に取り組めば知恵が生まれ、中途半端では愚痴が、いい加減では言い訳ばかり。」野球の大谷選手は高校時代から武田信玄のこの言葉を胸に、自らの戒めとして今日の偉業を成し遂げたようです。学問や研究も同じです。高校生の皆さん、自己研鑽を重ね、探求心や好奇心を胸に、未来を切り拓く力を磨いてください。

助教 古川 大介

PROFILE

学 位／博士(医工学)
専門分野／生体計測工学

指導教員がきめ細かく研究をサポート

SUPPORT

緒言

レモンは、世界的に広く栽培・消費されている主要な果樹の一つであり、ビタミンCや各種機能性成分を豊富に含むことから、食料・加工・医療・化粧品分野など多岐にわたる用途を有している。商業栽培において代表的なレモン品種である、リスボンレモン (Lisbon lemon) は、樹勢が強く、耐風性や収量性に優れ、柑橘類の中では比較的耐寒性がある。しかしながら、依然として低温や霜害に対して脆弱であり、そのため、日本国内では温暖地域を中心に栽培が行われてきた。



図1 “ChatGPT” に雪国レモンの報道記事を読み込ませ生成したAI画像

近年、レモン栽培に適さないとされてきた東北地方 (山形県) において、施設栽培技術の導入や栽培管理技術の高度化により「雪国レモン」の試験的生産 [1] が開始され、従来は困難とされた寒冷地でのレモン栽培が現実味を帯びてきた (図1)。この動向は、環境制御技術の進展によって栽培可能域が拡張しつつあることを示すものであり、寒冷地農業における新たな高付加価値作物としての可能性を示唆している。

本研究では、さらに寒冷条件が厳しい“秋田県”におけるレモン栽培の実現可能性について検討する。秋田県は冬季の積雪および長期間の低温環境を特徴とし、露地での柑橘栽培は極めて困難であることに加え、寒冷地特有の課題として日照時間の短さと曇天や降雪の影響による実効的な日射量が制限される地域である。レモンは光要求の高い果樹であり、十分な日射量は光合成に重要である。そのため、寒冷地における栽培では、日照時間および照射強度の光環境を植物個体の情報をもとに評価し、補光を含めた総合的な生育環境を構築する必要がある。植物は、低温および不足などのストレスにさらされると外観症状が現れるが、症状が現れる以前では植物内部の生理的变化が生じる。このような症状を早期的に把握する手法とし、植物生体電位を用いたヘルスマニタリングが有効であると考える。植物は温度変化や光環境の変動、水分状態などの外部刺激に応答して電位変化を示すことが知られており、これらの生体電位信号は植物体内の情報伝達機構と密接に関係している。生体電位を連続的に計測することで、外観的障害が顕在化する前段階の生理的ストレス応答を非破壊かつリアルタイムに検出できる可能性がある。特に寒冷地環境下では、低温ストレスと光不足ストレスが複合的に作用するため、単一環境要因のみを指標とした管理では植物の状態を十分に把握できない可能性がある。そこで、本研究では日照時間および照射強度の実測データと植物生体電位の変動を統合的に解析し、光環境と植物生理応答との関係性を明らかにすることを目的とする。これにより、光環境の変動がレモンの生育、光合成活性に与える影響について評価し、環境制御型のレモン栽培の実現に向けた基礎的試験を提供することを目的とする。

植物生体電位を用いたヘルスマニタリング

2.1 植物生体電位

細胞電位測定は細胞膜を挟んだ電位差を直接計測できるため精度が高いが、侵襲的であり植物体への負担が大きい。これに対し、表面電位測定は非侵襲的に計測可能であり、長時間の連続測定に適している。本研究では、植物への影響を最小限に抑えつつ光応答を評価するため、表面電位測定を用いた。植物の細胞内イオンの移動によって生じる生体電

位は、光合成の光化学反応に伴い動的に変化する。光刺激により葉緑体内でプロトン (H^+) の移動や電子伝達系の活性化が生じ、それに伴うイオンバランスの変化が膜電位変動 (図2) として観測される。本研究で計測する生体電位は、光合成における物理化学的反応過程と関連しており、電位変化を指標とすることで光合成活動の応答特性 (ヘルスマニタリング) を評価することが可能と考える。

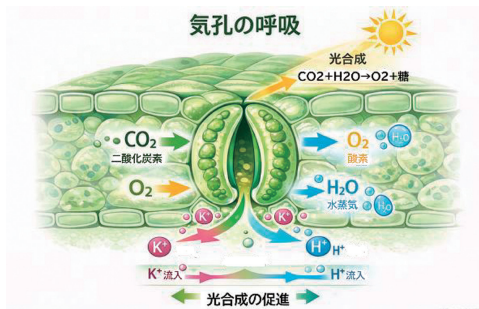


図2 光合成によるイオン移動

2.2 植物ヘルスマニタリング計測システム

植物生体ヘルスマニタリング計測システムを図3に示す。本システムは、植物生体電位センサ、光合成用照明および光電センサから構成される。図のように土壤内部にグランドを設置し、葉面に電極を貼付けている。光合成によって生じる葉面電位は植物生体電位センサに送信される。植物生体電位センサ内部では、差動増幅器により電極間の電位差およびノイズ処理を行い、分圧回路通りローパスフィルタ (10Hz) により高周波ノイズを除去 [3] している。さらに、増幅回路および加算回路 (+2.5V) を通り、0Vから5Vの電圧範囲をArduino UNOのアナログ入力に送信している。Arduinoでは、12bitにてAD変換されUSBを経由しPCにて植物生体電位信号を取得した。また、暗室内は白色の照明を利用し、光量計測にはPAR (Photosynthetically Active Radiation) メータ (VBR-100-PAR, vabira, Shenzhen Depowersupply Electrical Co.,Ltd) を使用し、Bluetooth接続しスマートフォンによるモニタを行い、照明の切り替え信号として、光電素子 (CdSセンサ) により取得した。各センサの信号は、サンプリング周波数5 Hz (サンプリング時間0.2sec) にて取得した。

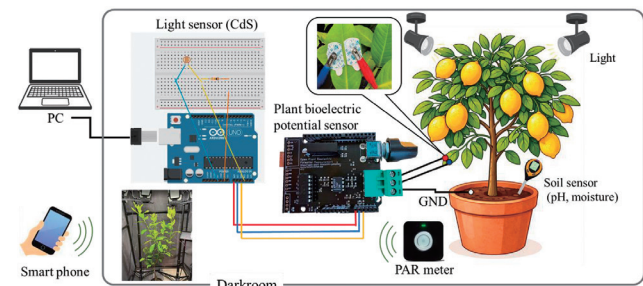


図3 植物ヘルスマニタリング計測システム

2.3 植物育成と実験方法

寒冷条件下におけるレモン栽培の実現可能性を検討するため、寒さに強いリスボンレモン苗木 (3年) を計測対象に用いた。レモンの生育環境を考慮し、土壌は水はけに優れた培養土を使用し、根腐れ防止と排水管理を行った。植物の光育成環境には、PARメータ (Photosynthetically Active Radiation: PAR) を用い、光合成光量子密度 (PPFD) を参考に設置場所の選定を行った。その結果、夏季では日中の光合成光量子密度 (PPFD) が光量水準を大幅に超えたため、屋外環境下で過度な光ストレスおよび葉焼け防ぎ、直射日光を緩和した日陰条件となる場所にて育成した。一方、冬季では降雪の影響により葉面に雪が積もるため、室内かつ日当たりの良い場所 (秋田県由利本荘市の冬季における自然光条件に近い光環境) に移動し、学内の室温にて育成した。給水量に関し、夏季では、土壌の乾燥を確認し、日ごとに給水を実施し、冬季には給水頻度を抑え、土壌水分状態に応じて適宜調整した。

本研究では、光環境と植物健康状態との関連を明らかにし、日照時間が短く秋冬期に曇天が多い秋田県域におけるレモン栽培の実現性を検討することを目的としている。このため、温度条件は比較的自然な温度環境下かつ外的加温を実施せずに育成した。植物健康状態を評価する植物生体電位計測は、秋期から冬期にかけ実測を行った。さらに、光強度と植物健康状態との関連性について検討するため、暗室内にて光強度を3パターン (PAR値: 12.9, 77.9, 153 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) に設定し、照明の消灯点灯に10分間ごとに繰り返し、植物生体電位の応答特性から植物健康状態を評価した。なお、暗室内に暗闇状態で約15分間静置後に、計測を実施した。

実験結果および考察

表1に示す計測環境において植物生体電位に計測実験を行った。結果の一例を図4に示す。図4 (a) - (c) は、照射光強度が低強度から高強度へと変化させた植物生体電位であり、同時に示す矩形波は、照明の消灯点灯を示す。図4 (a) では、点灯と同時に緩やかに植物生体電位が緩やかに減少し、その後、上昇へ転じる傾向が確認できる。照射強度を高くすると、植物生体電位の減少・上昇傾向の時間が短縮されていくことが分かる。この生体電位の初期減少は、光合成の反応開始に伴い、細胞膜においてイオンが移動による膜電位変化に起因すると考えられる。光照射が継続することでイオン移動が定常状態に達し、細胞内外のイオン濃度勾配が再調整される結果、生体電位は回復・上昇傾向を示す。さらに、照射光強度を高くすることで光化学反応速度が増加し、電位変化に要する時間が短縮される傾向が観察されたと考える。これらの結果は、植物生体電位の応答が光合成活性の動態と密接に関連しており、生体電位の測定が光合成機能の非破壊評価指標として有用であることが示唆される。

以上より、日照時間および日照強度の低い地域においても、適切な栽培条件を設定すればレモンの光合成活性を維持し、成長や果実生産が可能であることを示す重要な知見であると成り得る。なお、冬季では建物内にてレモンの苗木を育成した。最低室温は3度程度であったが、低温環境下においても、光合成活動の維持を確認出来た。これは、耐寒性が低いとされるレモン栽培において、寒冷地栽培における冬季の生育管理に新しい指標を提供できると考える。

結論

本研究では、冬季における曇天や照射強度が低下する寒冷地における、レモン栽培の可能性を評価するため、照射強度と植物生体電位から光合成活性に与える影響について評価、環境制御型のレモン栽培の実現に向けた基礎的試験データを提供することを目的とした。

植物生体電位の計測実験にて、照射光強度を低・中・高と変化させ光合成活性の応答を連続かつ非破壊的に観察した。その結果、照射光の点灯直後には生体電位が一時的に減少し、その後回復・上昇する傾向が確認され、照射強度が高い条件ほど電位応答に要する時間が短縮されることが明らかとなった。これにより、植物生体電位の測定が、外観症状が現れる前段階での生理的ストレス応答を捉え、光環境による光合成活性の変動を評価するための有効なヘルスマニタリング手法であることがわかった。さらに、この手法を用いることで、寒冷地においても適切な光環境や補光条件の設定を含めた環境制御型レモン栽培の実現に向けた管理戦略の基礎情報を得ることが可能である。

表1 計測環境

パラメータ	弱光 (a)			中光 (b)			強光 (c)		
光量 (PAR)	15 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$			79.3 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$			160 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$		
	R:5.0	G:7.3	B:2.8	R:23.2	G:36.4	B:19.7	R:46.1	G:73.4	B:40.5
気温	13.6 $^{\circ}\text{C}$			12.5 $^{\circ}\text{C}$			12.7 $^{\circ}\text{C}$		
湿度	48 %			53 %			55 %		
土壌温度	11 $^{\circ}\text{C}$			11 $^{\circ}\text{C}$			11 $^{\circ}\text{C}$		
土壌酸度 pH	7.0			7.0			7.0		
土壌水分量	DAY (5~10%)			DAY (5~10%)			DAY (5~10%)		

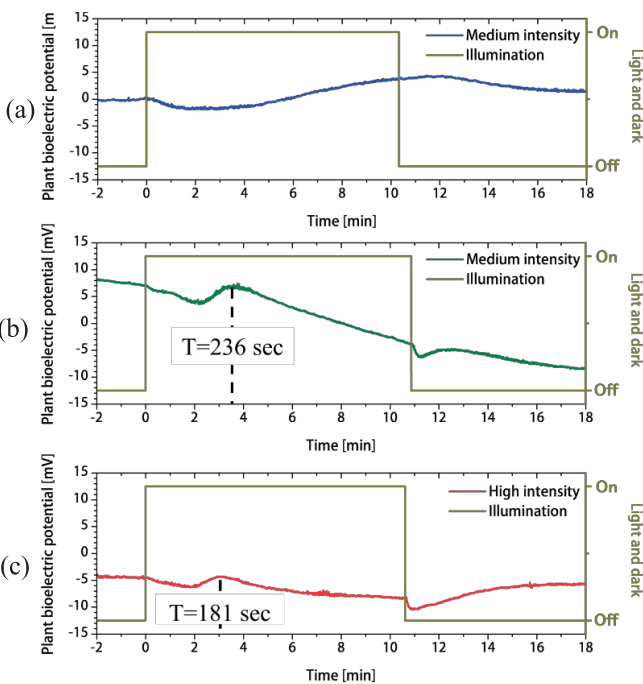


図4 光強度変化による植物生体電位の応答

(a) 低強度 $15\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (b) 中強度 $79.3\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (c) 高強度 $160\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

参考文献

1. 読売新聞オンライン, <https://www.yomiuri.co.jp/local/yamagata/news/20260127-GYTNT00174/>, 2026.1.28
2. 大藪多可志, 勝部昭明 “植物生体電位とコミュニケーション”, 海文堂出版, (2009), ISBN 4303710326
3. 西田騎夕, “植物生体電位を測ろう!”, 植物生体電位測定をオープンにするプロジェクト, (2022), 電子版v1.1

補足

レモンの苗木の育成状況について以下に記す。
令和7年6月中旬: レモン (3年生) 苗木を購入
令和8年2月25日: つぼみを確認
令和8年3月15日: 開花