

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26292134

研究課題名(和文) SPA技術を基盤とした並列試行型強化学習による太陽光植物工場への知能実装

研究課題名(英文) Intelligent greenhouse with SPA based parallel trial environmental control with enforced learning

研究代表者

高山 弘太郎 (Takayama, Kotaro)

愛媛大学・農学研究科・教授

研究者番号：40380266

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らが開発した実装型クロロフィル(Chl)蛍光画像計測ロボットを用いて、意図的にわずかに異なる環境条件を設定した場合の作物の生育状態を比較することで最適栽培環境条件を自動探索する仕組みの確立を最終的な目標として、その前提となるChl蛍光画像計測ロボットによる高時間・高空間分解能の多元的生体情報計測技術の基盤アルゴリズムの開発を行った。Chl蛍光画像計測ロボットを用いて茎伸長計測を行うために、計測対象個体群のパノラマChl蛍光画像を取得し、日単位の茎伸長計測を行った。同様の方法で、その他の成長指標の計測も行い、日単位の成長の把握を可能にした。

研究成果の概要(英文)：The crop centric character for this highly-sophisticated strategy for environmental control in greenhouses, is expressed by the term speaking plant approach (SPA), which was coined in the seventies of the last century and received growing attention ever since. Chlorophyll fluorescence (CF) imaging robot, which was developed in our previous studies and come onto the market in 2015, provide information on not only the photosynthetic performance but also daily growth such as stem elongation and leaf expansion of plant canopy under greenhouse condition without destruction or contact with the living plant. In this study, we developed the basic algorithm for the growth measurement and verified the usefulness of the daily plant growth data in commercial greenhouses. This might be one of the most important factors for the SPA concept based greenhouse with parallel trial environmental control with enforced learning.

研究分野：農業情報システム学

キーワード：植物診断 センシング データ解析 生体情報計測 植物工場

1. 研究開始当初の背景

太陽光植物工場は、太陽光エネルギーを最大限に活用して大規模な農作物生産を行う施設であり、二酸化炭素・気温・湿度等を対象とした環境制御技術と ICT・自動化・機械化等の先端工業技術との融合により、地域における農作物生産の効率を最大化するシステムとして確立されつつある (Fig. 1)。また、太陽光



Fig.1 太陽光植物工場におけるトマトの周年栽培

植物工場先進国のオランダでは、競争力強化を目的とした超大規模化 (経営・生産規模の拡大) が進行しており、栽培面積が数十 ha に達する生産者も出現している。このような背景のなか、わが国においても国際競争力を有する農作物生産システムとして従来の 20~100 倍の栽培面積 (20~100 ha) を有するメガスケール植物工場構想が提案され (Fig. 2)、その社会実装のために必要となる技術的要素や社会基盤整備について、産学 (スマート・メガスケール植物工場研究会、日本学術会議農業情報システム学学科会) が密に連携した議論が始まっている。

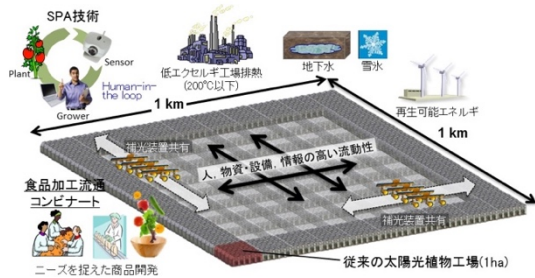


Fig. 2 メガスケール太陽光植物工場の構想概念図

一方、このように高度化した環境制御技術の性能を十分に発揮させるためには、植物の生育状態に合わせて環境制御の設定値を適切に更新し続ける必要がある。つまり、植物の生育状態の見極め能力の高低が生産性の高低に直結することになるが、この「植物の生育状態の見極め」は、いまだに栽培管理者の目視による観察と経験に基づいた主観的判断に委ねられており、毎日の植物の生育状態を評価するための信頼できる数値データが存在しない。他方、近年のセンシングデバイスの低廉化と IoT の普及により、太陽光植物工場に実装可能な植物生体情報計測技術が提案されつつあり、ビッグデータ解析技術との連携を通じて「植物の生育状態の見極めの数値化」が現実味を帯びてきている。

2. 研究の目的

研究代表者らが開発した実装型クロロフィル (Chl) 蛍光画像計測ロボットを用いて、意図的にわずかに異なる環境条件を設定した密閉性の高い小室 (栽培面積 1~2ha を想定) 間で作物の生育状態を比較することで最適栽培環境条件を自動探索する仕組みの確立を最終的な目標として、その前提となる Chl 蛍光画像計測ロボットによる高時間・高空間分解能の多元的生体情報計測技術の基盤アルゴリズムの開発を行った。

3. 研究の方法

Fig. 3 は、研究代表者らが基盤技術を開発し、井関農機 (株) より市販された Chl 蛍光画像計測ロボット (PD6C) である。本装置は太陽光植物工場内の 1 レーンを夜間に自動走行し、トマト個体群の Chl 蛍光画像を計測する。Chl 蛍光は、Chl が吸収した光エネルギーのうちで光合成に使われずに余ったエネルギーの一部が赤色光として捨てられたものである。青色 LED を用いて植物葉に青色光を照射 (励起光) すると、植物葉は照射光の反射光と光照射により励起された Chl 蛍光を発する。CCD カメラの前部にロングパスフィルタ等を配置して青色の反射光成分を除去することで、Chl 蛍光画像の撮像が可能となる。さらに、本ロボットの画像計測機能を強化することにより茎伸長等の成長指標の計測を可能にする。

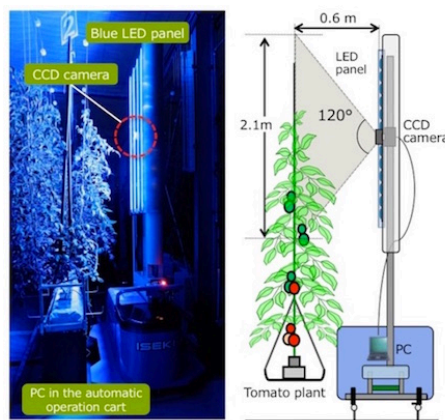


Fig. 3 研究代表者らの研究成果を活用して井関農機 (株) より市販された Chl 蛍光画像計測ロボット

4. 研究成果

4.1 Chl 蛍光画像計測ロボットによる茎伸長計測 (1) キャリブレーション (CS) Chl 蛍光画像の取得

前述の Chl 蛍光画像計測ロボット (Fig. 3) は、広角レンズ (118.6° [V] × 90° [H]) を装着した近赤外域にも感度を有するカラー CCD カメラを LED パネルの中央部に有し、カメラから 0.6 m の距離にある 2.1 m [H] × 1.2 m [W] の範囲の植物体の Chl 蛍光画像を撮影する。このロボットを用いて茎伸長計測を行うため、LED を点灯した状態で個体群内を走行させて計測対象個体群のパノラマ Chl 蛍光画像 (Fig. 4) を取得し、この画像を茎伸長自動計測ソフトウェア (トマト個体群を水平にス

キャンする形で連続的に撮影された Chl 蛍光画像のなかから個体を正面 [中央] に捉えた画像を抽出するアルゴリズム)を用いて解析することにより毎日の茎伸長を計測する。



Fig. 4 トマト個体群の CS-Chl 蛍光画像

(2) Chl 蛍光強度の違いに基づいた計測対象個体の抽出

Fig. 5(左)に、Chl 蛍光強度の違いに基づいた計測対象個体の抽出の概要を示す。蛍光収率(=発せられる蛍光強度/入射する励起光強度)が一定の蛍光シートの場合と比較して、蛍光収率が励起光強度で変化する植物葉(弱い励起光強度条件下で、Chl 蛍光収率が小さくなる)は、光源からの距離が遠くなるほど(励起光強度が弱くなるほど)Chl 蛍光収率が低下するため、茎伸長計測の対象とする手前の個体群とその後方にある計測対象ではない個体群の蛍光強度の差が大きくなる。この特徴を利用して、CS-Chl 蛍光画像を一定の輝度を閾値として二値化することにより、茎伸長計測の対象とする手前の個体群のみを抽出する。Fig. 5-右 A に、CS-Chl 蛍光画像を示す。画像中央部に計測対象ではない後方の個体(Non-target)が撮像されているが、輝度閾値を 50 にして二値化することで、この個体を消去できた(Fig. 5-右 B)。

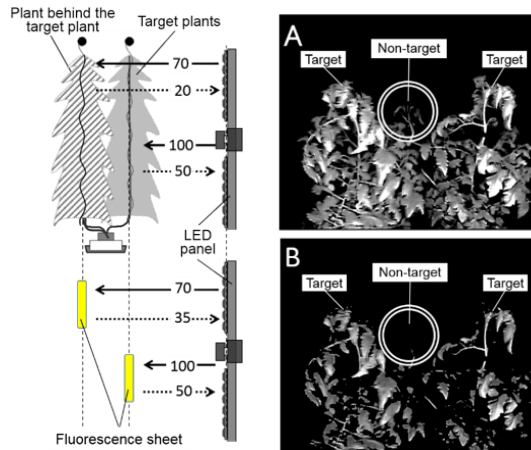


Fig. 5 Chl 蛍光画像を用いた計測対象個体の抽出の概念図(左)と閾値設定による抽出例(右-A: 抽出前, 右-B: 抽出後[輝度 50 以上の領域])

(3) CS-Chl 蛍光画像解析アルゴリズムの最適化

愛媛大学植物工場研究センターの同一レーン上で栽培されているトマト (*Solanum lycopersicum* L., 大安吉日) 個体群を対象として計測を行った。市販方 Chl 蛍光画像計測

ロボットの LED を点灯した状態で個体群内を走行させ、計測対象群の全体を対象とした CS-Chl 蛍光画像を取得した。

Fig. 6 に、輝度閾値を 50 から 200 まで変化させた場合の茎頂高検出率 (茎伸長自動計測ソフトウェアで検出された個体数/目視で検出した個体数)とエラー率(茎頂高検出エラーの個体数/茎伸長自動計測ソフトウェアで検出された個体数)の変化を示す。輝度閾値の設定が適切でない場合(輝度閾値: 50-90)は検出エラーが発生するが、輝度を変更する事でエラーが 0 になる領域(輝度閾値: 120-140)が出現することが示された。さらに輝度閾値を大きく(輝度閾値: 160-200)すると、植物体が正面に来ていないにもかかわらず植物体の下葉(Chl 蛍光画像計測ロボットに接近している葉)に反応して正面個体として検出するエラーの発生が確認された。

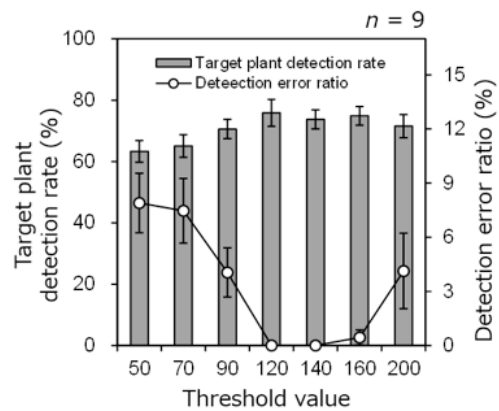


Fig. 6 輝度閾値と茎頂検出率の関係

4.2 市販の Chl 蛍光画像計測ロボットへの実装

(1) キャリブレーション(CS)モードの追加

従来の光合成機能計測に加え、茎伸長計測を行うため、Chl 蛍光画像計測ロボットに新たな動作モードを追加した。Fig. 7-B-C に、Chl 蛍光画像計測ロボットの動作モードを示す。ロボットは計測始発点(Starting point)から栽培レーンに沿って奥行き方向に進行し、レーン端(End)で折り返して始発点に戻る。往路では CFI (Chlorophyll Fluorescence Induction) 計測 (CFI モード)、復路では CS (Canopy Scan) 計測 (CS モード)を行う。

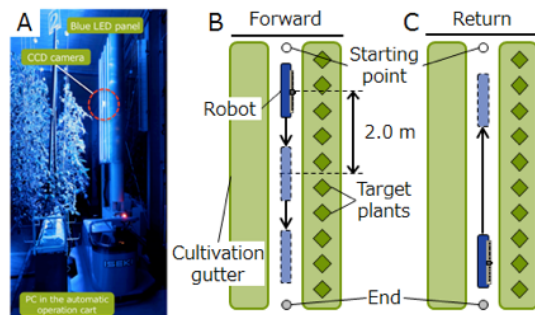


Fig. 7 Chl 蛍光画像計測ロボットの写真(A)と計測の動作モード(B,C)

CFI モードでは、一定間隔で停止して Ch1 蛍光励起用 LED を点灯し、クロロフィル蛍光インダクション画像計測（光合成機能評価）を行う (Fig. 7-B). CS モード (Fig. 7-C) では、LED を点灯した状態で走行し、Ch1 蛍光パノラマ画像 (Fig. 4) を取得する。

(2) 70 日間のトマト個体群の茎伸長計測

供試植物として愛媛大学植物工場研究センターの植物工場 A で栽培されているトマト (*Solanum lycopersicum* L., りんか 409, 定植日: 2015/8/24) 個体群 (50 個体) を用いて計測した。計測は 2015/12/23~2016/3/1 の 70 日間にわたって行い、連日 Ch1 蛍光画像計測ロボットを CS モードで動作させ、個体群の全体を対象とした Ch1 蛍光画像を取得した。計測した画像を茎伸長自動計測ソフトウェアを用いて解析し、植物体の高さ (以降、茎頂高) の平均値を求めた。Fig. 8 に、CS モードで計測された日単位の茎頂高の変化 (A) と同一個体群のうち 8 個体を対象としてテープメジャーを用いてマニュアル計測した 1 週間毎の茎伸長と、日単位の茎頂高データを用いて算出した 1 週間毎の茎伸長の変化 (B) を示す。両者の経時変化の相同性は高く、高い相関が確認された (Fig. 8-C)。

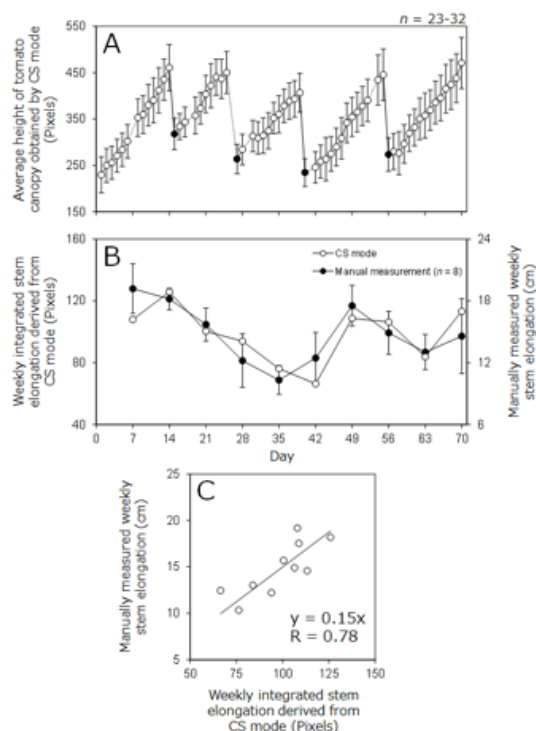


Fig. 8 CS モードで計測された日単位の茎頂高の変化 (A), CS モードとマニュアル計測の週単位の茎伸長の変化 (B) とそれらの相関 (C)

上記の開発により、Ch1 蛍光画像計測ロボットによる高時間・高空間分解能の多角的生体情報計測技術の基盤アルゴリズムが確立され、商業的太陽光植物工場における実証試験フェーズに移行することとなった。また、本技術を活用することで、高次元生体情報を用いた

パターン認識による植物診断等が可能となる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

1. 坂井義明・稲葉一恵・高山弘太郎. 植物生育診断装置による植物の環境応答の計測. 農業食料工学会誌. 80(3), 148-154. 2018.
2. 下元耕太, 仁科弘重, 高橋憲子, 高山弘太郎. 表計算ソフト Excel を用いた施設生産トマトの年間期待収穫量概算ツールの開発. Eco-Engineering, 30(2), 47-58, 2018. <https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.30.47>
3. 下元耕太, 仁科弘重, 高橋憲子, 高山弘太郎. 個葉光合成特性評価のための標準的計測プロトコルにおける気孔コンダクタンスとリン酸律速の影響. Eco-Engineering, 29(3), 73-80, 2017. <https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.29.73>
4. Keita Hirayama, Kotaro Takayama, Shinsuke Haruta, Hiroshi Ishibashi, Ichiro Takeuchi. Effect of low concentrations of Irgarol 1051 on RGB (R, red; G, green; B, blue) colour values of the hard-coral *Acropora tenuis*. Marine Pollution Bulletin, 124(2), 678-686, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.027>
5. 高山弘太郎. 植物の生育を知る -光学モニタリングシステム-. 光学, 46(1), 14-18. 2017.
6. 高山弘太郎. 2016-2017 日蘭国際共同研究を通じて見えるもの [1] オランダの現状と日蘭国際共同研究の概略. 農業および園芸. 92(3), 232-242. 2017.
7. 高山弘太郎. 2016-2017 日蘭国際共同研究を通じて見えるもの [2] 収穫量増大に貢献する環境制御技術: オランダと日本で異なるアプローチ. 農業および園芸. 92(5), 458-464. 2017.
8. 高山弘太郎. 2016-2017 日蘭国際共同研究を通じて見えるもの [3] オランダ型の労務管理: 栽培管理作業・オートメーション・日本との違い. 農業および園芸. 92(6), 505-512. 2017.
9. 高山弘太郎. 植物生育状態の把握と栽培管理への高度なフィードバックに向けた取り組み. 施設と園芸, 172, 60-65. 2016.
10. Takanobu Higashi, Yusuke Tanigaki, Kotaro Takayama, Atsushi. J. Nagano, Mie. N. Honjo and Hirokazu Fukuda. Detection of Diurnal Variation of Tomato Transcriptome through the Molecular Timetable Method in a Sunlight-Type Plant Factory. Frontiers in Plant Science, DOI: 10.3389/fpls.2016.00087, 2016.
11. 橋田祐二, 高橋昭彦, 高橋憲子, 仁科弘重, 高山弘太郎. 高軒高温室における夜間気温および養液濃度の違いがパプリカの生育と

収量に及ぼす影響. *Eco-Engineering*, 28(2), 29-36, 2016.

<https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.28.29>

12. 高山弘太郎. 一生体情報に基づく施設園芸の高度化- 生育状態の変化を正確に把握. *機械化農業*, 2016年7月号, 11-15. 2016.

13. 橋田祐二, 高橋昭彦, 下元耕太, 高橋憲子, 仁科弘重, 高山弘太郎. 高軒高温室における長期の加湿処理による飽差環境の違いがパプリカの葉の形態・光合成機能および収穫物に及ぼす影響. *Eco-Engineering*, 27(3), 91-98, 2015. DOI: <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.27.91>

14. Yusuke Tanigaki, Takanobu Higashi, Kotaro Takayama, Atsushi J. Nagano, Mie N. Honjo, Hirokazu Fukuda. Transcriptome Analysis of Plant Hormone-Related Tomato (*Solanum lycopersicum*) Genes in a Sunlight-Type Plant Factory. *PLOS one*, DOI: 10.1371/journal.pone.0143412, 2015.

15. 高山弘太郎. クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる植物診断. *ハイドロポニクス*, 29(1), 28-29. 2015.

16. 高山弘太郎. クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる高精度植物生体情報計測-太陽光植物工場の知能化にむけて-. *研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)*, 2015-CVIM-197(5), 1-4. 2015.

17. 高山弘太郎. 太陽光植物工場における農作物生産の品質管理. *品質*. 45(2), 19-23. 2015.

18. 高山弘太郎. 植物診断ロボットを用いた太陽光植物工場の環境制御の高度化. *科研費 NEWS* 2015年度, 3, 13. 2015.

[学会発表] (計 23 件)

1. Kotaro Takayama. Daily plant data for highly sophisticated greenhouse agricultural production. 2018 International Forum on Protected Horticulture. 2018, Shouguang, China (Hotspring Grand Hotel)

2. 高山弘太郎. 環境制御技術の研究最前線-将来の施設生産の姿-. 次世代型こうち新施設園芸技術フェア. 2016, 高知市(おばさんセンター大ホール)

3. 高山弘太郎. 施設園芸のブレークスルーをめざして-植物生体情報を活用した栽培管理-. 施設園芸イノベーションシンポジウム. 2016, 宇都宮市(栃木県産業技術センター 多目的ホール)

4. 高山弘太郎. ロボット化された植物診断技術が可能にする大規模生産管理. 日本学術会議公開シンポジウム スマート・メガスケール植物工場ネットワークによる国際競争力のある農作物生産. 2016, 日本学術会議講堂(東京都)

5. Shimomoto K., Takahashi N., Nishina H., Takayama K. Comparison of Measurement and Simulation of Photosynthetic Rate at a Level of Full Size Tomato Plant. ISTTH2016, Cairns, November, Program:36. 2016.

6. 高山弘太郎. 光合成と蒸散の基礎・生育状態(草勢)把握のための生体情報活用. 平成27年度 こうち新施設園芸セミナー. 2016, 高知県四万十町(JA 四万十本所 3F 大ホール)

7. 高山弘太郎・稲葉一恵・高橋憲子・仁科弘重. クロロフィル蛍光画像計測ロボットデータを用いたトマト個体群の生育診断アルゴリズムの開発. 農業情報学会 2016年度年次大会, 東京, 5月, 講演要旨: 85-86. 2016.

8. 下元耕太・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. 太陽光植物工場におけるトマト個体群の光合成蒸散速度の長期間連続計測. 農業情報学会 2016年度年次大会, 東京, 5月, 講演要旨: 79-80. 2016.

9. 稲葉一恵・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. スマートフォンを用いたクロロフィル蛍光画像計測による光合成機能診断. 農業情報学会 2016年度年次大会, 東京, 5月, 講演要旨: 107. 2016.

10. 下元耕太・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. 低コスト CO2 濃度差計測ユニット. 農業情報学会 2016年度年次大会, 東京, 5月, 講演要旨: 108. 2016.

11. 荒瀧三千丈・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. 葉面計測専用ブルーシート (10cm×10cm 赤色リファレンス付) の開発. 農業情報学会 2016年度年次大会, 東京, 5月, 講演要旨: 107. 2016.

12. 宮崎祐輔・高橋憲子・高山弘太郎・仁科弘重. 太陽光植物工場における生体情報を活用したトマト果実の品質予測. 第75回農業食料工学会年次大会, 京都, 5月, 講演要旨: 195. 2016.

13. 下元耕太・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. 最大光合成速度決定プロセスにおけるトリオースリン酸律速の影響. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 108-109. 2016.

14. 下元耕太・後藤大介・四十宮隆俊・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. 個体群レベルの光合成蒸散計測システムを用いた床面敷布型光反射性シートによるトマト個体群の光合成促進効果の評価. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 28-29. 2016.

15. 戸田清太郎・東 潤・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. クロロフィル蛍光画像計測ロボットを用いた茎伸長・葉量変化自動計測システムの開発. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 106-107. 2016.

16. 高山弘太郎・荒瀧三千丈・高橋憲子・仁科弘重. 陽子移動反応質量分析計 (PTR-MS) を用いた VOC 吸収・放出高時間分解計測システムの設計指針の検討. 日本生物環境工学会

2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 104-105. 2016.

17. 高山弘太郎・玉井菜奈・高橋憲子・仁科弘重. トマトの樹勢見える化のための生育スケルトンのデフォルメンテーション. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 124-125. 2016.

18. 高山弘太郎・稲葉一恵・高橋憲子・仁科弘重. クロロフィル蛍光画像計測ロボットデータを用いたトマト個体群の環境応答特性把握. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 122-123. 2016.

19. 戸田清太郎・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. 小型クロロフィル蛍光画像計測装置の開発. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 268-269. 2016.

20. 稲葉一恵・玉井菜奈・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. 生育調査データを用いたトマトの樹勢の採点アルゴリズムの開発. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 242-243. 2016.

21. 玉井菜奈・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. トマトの生育状態把握指標としての「開花房の高さ」の有効性の検討 -延べ1,440個体を対象とした8ヶ月間の連続計測に基づいた考察-. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 244-245. 2016.

22. 荒瀧三千丈・高橋憲子・仁科弘重・高山弘太郎. クロロフィル a/b 比を用いたトマト個体群の光合成機能評価. 日本生物環境工学会 2016年金沢大会, 石川, 9月, 講演要旨: 234-235. 2016.

23. Kotaro Takayama. Daily Measurement of Tomato Plant's Biological Information with a Chlorophyll Fluorescence Imaging Robot. 2015年植物工場技術に関する公開講座-3. 2015, 中国北京市(中国農業大学)

〔図書〕(計3件)

1. 高山弘太郎: 生きものたちをつなぐ「かおり」～エコロジカルボラタイルズ～(分担), 211頁, 第4章 エコロジカルボラタイルズを応用に生かす 1. かおり成分計測による植物診断, pp. 168-178, フレグランスジャーナル社, 2016.

2. 高山弘太郎: 施設園芸・植物工場ハンドブック(分担), 576頁, 第Ⅶ部 植物工場, 第3章 太陽光型植物工場における生体情報計測と環境制御, pp. 323-327, 農山漁村文化協会(農文協), 2015.

3. 高山弘太郎・大政謙次: 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック(分担), 448頁, 第6章 センシングと生態工学 6-5 植物工場におけるセンシング, pp. 367-371, (株)アドスリー, 2015.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: 光合成速度計測システム

発明者: 高山弘太郎・下元耕太・仁科弘重・高橋憲子・稲葉一恵

権利者: 国立大学法人愛媛大学・PLANT DATA株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2018-62412

出願年月日: 2018年3月28日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計1件)

名称: Plant health diagnostic method and plant health diagnostic device

発明者: Kotaro Takayama, Hiroshige Nishina, Souchi Iyoki

権利者: 愛媛大学

種類: 特許

番号: Patent No. 9,377,404 B2,

出願年月日: Jun. 28, 2016

国内外の別: 国外(米国)

〔その他〕

ホームページ等

1. 愛媛大学植物工場人材育成プログラムにおける活用

<http://igh.agr.ehime-u.ac.jp/jinzai.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高山 弘太郎 (Kotaro Takayama)

愛媛大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号: 40380266

(2) 研究分担者

羽藤 堅治 (Kenji Hatou)

愛媛大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号: 50274345

高橋 憲子 (Noriko Takahashi)

愛媛大学・大学院農学研究科・講師

研究者番号: 80533306