

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：13904
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2016～2019
課題番号：15KK0284
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（国際共同研究強化）
研究課題名（英文）SPA based reinforcement learning for intelligent greenhouse (Fostering Joint International Research)
研究代表者
高山 弘太郎 (Takayama, Kotaro)
豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・教授
研究者番号：40380266
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円
渡航期間： 5ヶ月

研究成果の概要（和文）：スピーキング・プラント・アプローチ（SPA: Speaking Plant Approach）コンセプトは、様々なセンサを用いて植物生体情報を計測して生育状態を診断し、その診断結果に基づいて栽培環境を適切に制御するというものであり、植物工場の生産性を最大化させるための切り札として世界的に注目されている。本研究では、光合成蒸散リアルタイムモニタリングシステムとクロロフィル（以降、Chl）蛍光画像計測ロボットによって取得される多面的かつ高精度な植物生体情報を用いた植物環境応答（生育）モデルの構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発を試みた高精度植物生体情報に基づいた植物環境応答（生育）モデルを商業的太陽光植物工場における環境制御・労務管理等に適用することで、生産性（光合成や生育バランスが適切であること）が維持されていることを確認しつつ、肥料・水・熱の投入量（投入資源コスト）を最小化した生産技術の確立が可能となると考えられる。これは、企業の農業生産において重要視される利益の底上げとSDGsの達成に同時に貢献するものであり、植物生体情報計測技術の実装を加速化させるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The Speaking Plant Approach (SPA) is regarded as a desirable concept which defines that the environmental factors should be adjusted to the crop's physiological status. The first and most important step in the SPA concept is to obtain physiological information from a living plant. In this study, a robotized chlorophyll fluorescence imaging system that evaluates daily changes in photosynthetic function and growth such as stem elongation, leaf expansion and a photosynthesis measurement chamber that provides information on changes in photosynthetic/respiration rates at an interval of 5 min were used for the development of plant environmental response (growth) models.

研究分野：農業情報システム学

キーワード：植物診断 画像計測 光合成 蒸散 植物生体情報

様式 F-19-2

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、気温・湿度・CO₂・光強度などの様々な環境要因を制御するための設備を有し、コンピュータ化・情報化・自動化により高い生産性を達成している(図1)。しかしながら、最も重要な「植物の生育状態の把握」は人間の目視による観察と経験に基づいた判断に委ねられているのが現状である。しかし、最新の植物工場に導入される高度な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。近年のセンシングデバイスの低廉化とIoTの普及により、植物工場に実装可能な植物生体情報計測(フェノタイピング)技術が提案されつつあり、ビッグデータ解析技術やAI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。



図1 太陽光植物工場におけるトマト栽培

2. 研究の目的

Speaking Plant Approach(SPA)技術は、植物生体情報を計測し、それに基づいて栽培環境を最適に制御する一連の技術であり、太陽光植物工場の生産性最大化の切り札として世界的にも注目されている(van Straten et al., 2010)(本国際共同研究者のProf. van Hentenも本著の共著者)。大規模太陽光植物工場での生産性最大化のためには、生体情報計測(SPA)技術が必要不可欠であるが、同時に、知能的環境制御技術の確立も喫緊の課題である。この研究では、クロロフィル(Chl)蛍光画像計測ロボット等の高精度生体情報計測システムを用いて、季節変化を含む長期間にわたる生育状態の変化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(並列試行型強化学習による知能的環境制御)の構築を目的とする。

3. 研究の方法

実証試験のための商業的トマト生産太陽光植物工場を渡航先(オランダ)に確保し、オランダへの渡航にあわせて植物生体情報計測ロボットを導入して長期間に渡る生体情報取得を行うとともに、日本国内のトマト生産太陽光植物工場(愛媛大学植物工場研究センター)における植物生体計測も並行して行う。渡航期間は、日射量が最小となる秋季～冬季[第一渡航]と日射量が最大となる春季～夏季[第二渡航]とする。第一渡航では、植物生体情報計測ロボットを実証試験フィールドに設置し、高精度生体情報計測を実施するとともに、その情報を用いた環境応答モデルを作成し、モデルの精度評価を行う。国内では、愛媛大学植物工場研究センターにて小型計測装置の開発とその性能向上を行う。第二渡航では、春季から夏季にかけてのデータ取得と、同年データを用いた環境応答モデルを作成し、最低栽培環境条件の自動探索法を検討する。

4. 研究成果

(1) Chl 蛍光画像計測ロボットを用いたオランダにおける生体情報計測

図2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

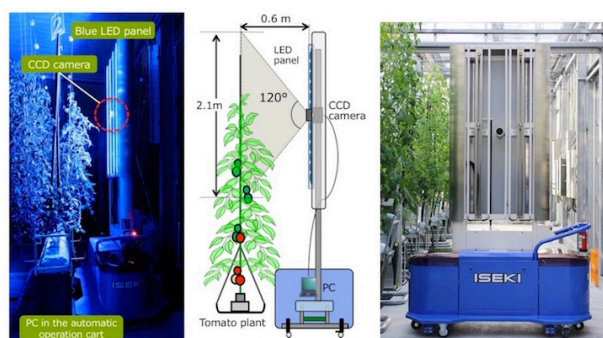


図2 井関農機(株)より市販されたChl 蛍光画像計測ロボット

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(高山・仁科 2008)。暗条件におかれた植物葉に一定の強さの励起光照射を開始すると、Chl 蛍光強度が経時的に変化する現象が確認されるが、この現象はインダクション現象とよばれ、大政謙次東大名誉教授により1987年に世界で初めて画像計測された(Omasa et al. 2007)。なお、インダクション現象中の蛍光強度変化を表す曲線をインダクションカーブとよび、その形状は葉の光合成能力の高低や種々のストレスの影響を受けて変化するため、カーブの形状指標を

用いることで光合成機能診断が可能となる (Takayama et al. 2012). 本研究では, 井関農機 (株) の協力を得て植物生育診断装置 (PD6C) をオランダの商業的トマト生産太陽光植物工場に導入して, 毎日の高精度植物生体情報 (Daily plant data) の取得を行った (図3)。愛媛大学・豊橋技術科学大学とワーゲニンゲン大学は, 毎日取得される高精度生体情報と環境情報を統合した即日解析による植物診断アルゴリズムの開発と診断結果に基づいた環境調節指針提案アルゴリズムの開発を行った。



図3 オランダのトマト生産太陽光植物工場に導入された植物生育診断装置

(2) 小型植物生体情報計測装置の開発

研究代表者らは, 従来型の小・中規模のビニルハウスにも導入可能な安価かつ小型の「つり下げ型の多角的植物生体画像情報計測ロボット」を提案した (加納ら 2018; 2019)。本ロボットは, Chl 蛍光画像計測に加えてカラー画像・NDVI 画像の計測が可能であり, 自動充電・自動計測機能, さらに, 自動昇降機能により, 植物体上部の葉・茎頂領域だけでなく, 植物体下部の果実領域を対象とした画像計測を可能である。図4に, 開発した小型植物生体画像計測装置の模式図(A)と写真(B)を示す。なお, 装置の大きさは, 0.6 m [H] × 0.6 m [W] × 0.06 m [D], 総重量は4 kg であり, 市販のChl 蛍光画像計測ロボット (PD6-C[®], 井関農機(株); 2.5 m [H] × 1.5 m [W] × 0.9 m [D], 総重量200 kg) と比べ, 大幅な小型化と軽量化を達成した (C) (戸田ら 2020)。

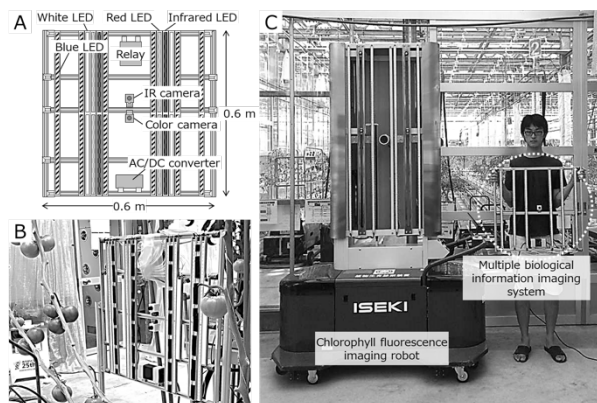


図4 小型植物生体画像計測装置の模式図(A), 写真(B), 従来の植物診断装置との比較(C)

(3) クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる日単位の成長評価

図5に, 平均茎頂高(A)と日茎伸長量(日単位の平均茎頂高の変化量) (B) の経日変化を示す(ロボットの不具合によりデータが欠落した12/29, 1/9, 1/17, 1/20, 2/1, 2/13を除く)。なお, 1/6, 1/18, 1/31および2/16(● in 図5)は, つるおろし作業によって茎頂高が低下していた。また, 1/22(▲ in 図5)は, 植物体に極度の萎れが確認され(Chl 蛍光画像を目視で確認), 茎頂高が低下していた。このような, データの欠落, つるおろし作業, 萎れ等により茎伸長量の算出ができなかった日については, 前日と翌日の茎伸長量の平均茎伸長を求めて代入した。今後, 同時に取得された環境条件との関係解析を進めることでより詳細な茎伸長の環境応答モデルの作成が可能になると考えている。

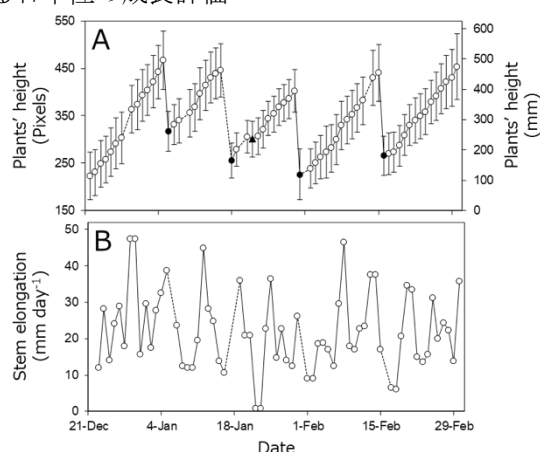


図5 Chl 蛍光画像計測ロボットを用いた日次の茎伸長計測の様子

<引用文献>

- ① van Straten G, van Willigenburg G, van Henten E, van Ooteghem R. Optimal control of greenhouse cultivation. CRC Press, Boca Raton. 1-305. 2010.
- ② 高山弘太郎, 仁科弘重. 施設園芸における植物診断のためのクロロフィル蛍光画像計測. 植物環境工学. 20: 143-151. 2008.
- ③ Omasa K, Shimazaki K, Aiga I, Larcher W, Onoe M. Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. Plant Physiol. 84: 748-752. 1987.
- ④ Takayama K, Miguchi Y, Manabe Y, Takahashi N, Nishina H. Analysis of Φ PSII and NPQ during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction phenomenon in tomato leaves. Environ. Control Biol. 50: 181-187. 2012.

- ⑤ 加納多佳留, 戸田清太郎, 高橋憲子, 仁科弘重, 高山弘太郎. つり下げ型 Ch1 蛍光画像計測システムの開発. 農業環境工学関連学会 2018 年合同大会 講演要旨集. GS22-5. 9/10-14. 2018.
- ⑥ 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. 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 講演要旨集. 9/17-20: 132-133. 2019.
- ⑦ 戸田清太郎, 高山弘太郎, 加納多佳留, 藤内直道, 高橋憲子, 仁科弘重, トマト個体群を対象とした多元的画像計測装置の開発, *Eco-Engineering*, 32(2), 33-37, 2020.
- ⑧ 戸田清太郎, 高山弘太郎, 加納多佳留, 藤内直道, 高橋憲子, 仁科弘重, クロロフィル蛍光画像計測ロボットを用いた日単位の茎伸長計測, *Eco-Engineering*, 32 (2) , 15-21, 2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 坂井義明・稲葉一恵・高山弘太郎	4. 巻 80(3)
2. 論文標題 植物生育診断装置による植物の環境応答の計測	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 148-154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 30(2)
2. 論文標題 ai tomatoプロジェクトが目指すパラダイムシフト - 高精度植物生体情報がつなぐAIと施設生産 -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 植物環境工学	6. 最初と最後の頁 87-90
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 55(9)
2. 論文標題 高度な環境制御に求められる植物生体情報計測	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 技術と普及	6. 最初と最後の頁 30-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 38(5)
2. 論文標題 太陽光植物工場の栽培管理に活用されるクロロフィル蛍光画像計測技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本リモートセンシング学会誌	6. 最初と最後の頁 414-417
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 182
2. 論文標題 多角的植物生体情報計測による施設生産の高度化 : AI活用に向けた取り組み	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 施設と園芸	6. 最初と最後の頁 29-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 41Noriko Takahashi, Nagisa Yokoyama, Kotaro Takayama, Hiroshige Nishina	4. 巻 56(4)
2. 論文標題 Tomato Fruit Lycopene Content after Storage at Different Storage Temperatures and Durations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environment Control in Biology	6. 最初と最後の頁 157-160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) Tomato Fruit Lycopene Content after Storage at Different Storage Temperatures and Durations	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 下元 耕太、仁科 弘重、高橋 憲子、高山 弘太郎	4. 巻 29
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Eco-Engineering	6. 最初と最後の頁 73~80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.29.73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 下元 耕太、仁科 弘重、高橋 憲子、高山 弘太郎	4. 巻 30
2. 論文標題 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	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Eco-Engineering	6. 最初と最後の頁 47~58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.30.47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 92(5)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 農業および園芸	6. 最初と最後の頁 458-464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 92(6)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 農業および園芸	6. 最初と最後の頁 505-512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 92(3)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 農業および園芸	6. 最初と最後の頁 232-242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 2016年7月号
2. 論文標題 - 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	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 機械化農業	6. 最初と最後の頁 11-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高山弘太郎	4. 巻 46(1)
2. 論文標題 植物の生育を知る - 光学モニタリングシステム -	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 14-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 戸田清太郎, 山内沙季, 高橋憲子, 仁科弘重, 高山弘太郎
2. 発表標題 クロロフィル蛍光インダクション現象のSlow phaseの多項式近似
3. 学会等名 日本生物環境工学会2018年東京大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 戸田清太郎, 加納多佳留, 高橋憲子, 仁科弘重, 高山弘太郎
2. 発表標題 トマトを対象とした自走式小型ロボットによる多元的植物生体情報計測
3. 学会等名 農業環境工学関連学会2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲葉一恵, 高橋憲子, 仁科弘重, 高木雄吾, 森泰二, 高山弘太郎
2. 発表標題 イチゴ葉における光合成機能の季節変化の解析
3. 学会等名 日本生物環境工学会2018年東京大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kotaro Takayama
2. 発表標題 Daily plant data for highly sophisticated greenhouse agricultural production
3. 学会等名 2nd Japan-Netherlands Dialogue on Agricultural Cooperation, Sub-committee meeting on utilization of robots and artificial intelligence (AI) in greenhouse horticulture (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kotaro Takayama
2. 発表標題 Daily plant data for highly sophisticated greenhouse agricultural production
3. 学会等名 2018 International Forum on Protected Horticulture (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山弘太郎
2. 発表標題 太陽光植物工場に実装可能な植物診断技術 -BVOC計測×光合成機能診断ロボット-
3. 学会等名 第23回農林害虫防除研究会広島大会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山弘太郎
2. 発表標題 植物生体情報を用いた太陽光植物工場における農作物生産
3. 学会等名 JAISAスマートアグリシンポジウム2018 in 愛媛 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山弘太郎
2. 発表標題 AIを活用した施設生産の確立に向けた高精度生体情報計測
3. 学会等名 スマートアグリコンソーシアム合同総会低コスト施設園芸研究ネットワーク戦略会議合同新施設園芸ICTセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山弘太郎
2. 発表標題 植物生体情報を活用した高精度栽培管理
3. 学会等名 GPEC 施設園芸・植物工場展 主催者セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山弘太郎
2. 発表標題 高精度生体情報計測が可能にする高度な農作物生産
3. 学会等名 人工知能未来社会戦略本部・農林・食料戦略調査会・農林部会合同スマート農業勉強会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田清太郎，東 潤，高橋憲子，仁科弘重，高山弘太郎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本生物環境工学会2016年金沢大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 戸田清太郎, 高橋憲子, 仁科弘重, 高山弘太郎
2. 発表標題 小型クロロフィル蛍光画像計測装置の開発
3. 学会等名 日本生物環境工学会2016年金沢大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ファンヘンテン エルダート (van Henten Eldert)	ワーゲニンゲン大学・Farm technology group・教授	