

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05899

研究課題名(和文)人工光型植物工場の環境制御への植物形質計測と環境・植物形質モデルの応用

研究課題名(英文) Phenotype measurement and environment-plant phenotype models to environmental control of plant factory with artificial lighting

研究代表者

古在 豊樹 (Kozai, Toyoki)

千葉大学・環境健康フィールド科学センター・名誉教授

研究者番号：90081570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：人工光型植物工場の生産性向上を目的として、発芽時刻の計測をカメラ画像の分析によって実地した。また、発芽時刻への影響因子として、気温・空気飽差、培地表面温度(放射温度計)、培地含水率を計測し、それらが発芽時刻におよぼす影響を重回帰分析した。次いで、植物工場におけるエネルギー・物質収支の解析に基づいて植物群落の正味光合成速度および蒸散速度を算定し、また電気エネルギー利用率、光エネルギー利用率、水利用率を算定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工光型植物工場は省資源・環境保全・省力型の野菜の地産地消生産システムとして近年世界的に研究と普及が進んでいる。節電の一層の推進に加えて、現在は、最適環境制御による収量と品質の向上が普及上の問題となり、多くの研究投資が行われている。本研究は申請者が開発した一貫した研究方法論に基づいて生産性向上に関する学術的成果を省資源・環境保全および食糧保障の向上に役立つ形で得ているので、社会における市民の生活の質の向上に貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Plant factory with artificial lighting (PFAL) is a plant production system with minimum use of resources (land area, water, labor, fertilizer, etc.) for local production for local consumption, and has been popularized in many countries. For future popularization, reduction in electricity consumption per kg of produce and yield and quality improvements are requested. We developed a methodology of productivity improvement with resource saving, environmental conservation and food security, and our research outcome will contribute to improving the quality of citizens life in our global society.

研究分野：植物環境工学

キーワード：エネルギー収支 環境制御 省資源 植物工場 植物特性計測 発芽 物質収支 モデリング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

21世紀における食料・資源・環境に関する3すくみ問題の解決に貢献をすべく、植物工場に関する研究開発が多くの国の産官学で進められ、また大型産業化への関心が世界的に高まっている。しかし、その産業化には、より一層の生産コスト低下と生産性向上および環境保全・CO₂排出量削減・省資源が必要とされていることから、その実現のための学術的方法論の開発研究が求められている。他方では、省資源と脱石油の制約下かつ農業人口と農地面積の減少下での安全・安心かつ高品質な生鮮野菜の生産と供給が期待されている。

生産コスト低下と生産性向上のために、近年の進展が顕著である人工知能(以下、AI) 情報通信、Omics、多変量非線形統計解析に関する技術の植物工場への導入が注目されている。さらには、それらの技術を統合した、環境-phenotype(植物の表現型形質)-genotype(遺伝型)-投資資源-生産性システムの構築とその植物工場における利用が進められようとしている。

他方では、植物成長におよぼす環境の影響および植物生産施設のエネルギー・物質収支に関してはモデリングとシミュレーションに関する過去の多大な研究蓄積の利用が有効と考えられている。上述の状況の中では、人工光型植物工場(以下、植物工場)における環境制御の論理構造を明確化した上で、それぞれの状況に即した妥当な学術的方法論を適用した研究の推進が望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人工光型植物工場における環境制御への非接触・非破壊な植物形質計測方法の構築および環境(入力)・植物形質(出力)モデルの構築であり、今後の植物工場における環境制御の根幹となる学術的方法論を技術的に実現することにある。その目的のために、最近開発された植物工場用の基本栽培モジュール(棚または複数の棚からなるラック。以下、栽培モジュール)を用いる。本研究では、与えられた条件と目的のもとでの環境最適値のセットを探索する。

この栽培モジュールを用いると、棚毎またはラック毎のCO₂収支解析と水収支解析から正味光合成速度と吸水速度・新鮮重増加速度が連続的に計測され、また蒸散速度が連続算定される。この手法は申請者らが商業生産用の植物工場に世界で初めて導入し、一定の成果をすでに得ている。この栽培モジュールを多数接続すれば大型の植物工場となるようにスケールアップ設計がなされているので、この栽培モジュールで構築されたラックでの計測・解析・栽培結果は、大型植物工場においてもそのまま適用し得る。

3. 研究の方法

環境制御の問題は、環境要因の設定値の時系列を決める問題とそれらの環境設定値を実現するための環境制御機器の「省資源的(節電的)」制御法の問題に大別される。本研究では前者を中心課題とするが、後者の課題にも取り組む。前者の環境要因の設定値は環境制御の達成目標(収量、品質、収穫時期) 生産コスト、生産物の市場価値などを考慮して決められる。後者の環境制御機器の「省資源的(節電的)」制御法は、当該資源(例えば電気エネルギー、水、CO₂、肥料など)の料金体系や環境設備機器の能力などの少数の変数でほぼ決定論的に決められる。現状では、環境設定値は植物工場責任者が経験と勘と過去のデータ分析に基づいて定められているので、これら設定値を論理的、合理的かつ自動的に決定する方法論とソフトウェアが求められている。

植物工場において制御される環境要因は、茎葉部要因と根圏部要因に大別される。前者には、気温、水蒸気飽差(VPD)、CO₂濃度、気流速度、光合成有効光量子束密度(PPFD)、ランプの分光分布などが含まれる。後者には、養液の温度、流量速度、pH、主要イオン濃度、溶存O₂濃度などが含まれる。これら環境要因の最適値は、生育段階、植物種・品種により異なる。さらには、これら環境要因の経済的な最適値は、環境制御コストおよび期待される生産価値により異なる。他に、養液栽培層の微生物(特に、病原性微生物)の生息密度や有害有機酸の濃度を環境要因に含まれる。

4. 研究成果

(1) 第一に、植物特性計測に関しては、植物成長の初期段階にあたる発芽時刻の正確な計測をカメラ画像の分析によって実施した。その計測に先立って、そのための装置を構築した。画像分析は教師データ付きディープラーニング法を用いておこない、発芽時刻を30分の精度で特定することができた。

(2) 発芽時刻に影響をおよぼす因子として、気温・空気飽差、培地表面温度(放射温度計)、培地含水率(電子天秤計測)を計測し、それら因子の発芽時刻におよぼす影響を重回帰分析した。上記の成果は、Frontiers in Plant Science誌に2020年に掲載された。

(3) 植物工場におけるエネルギー・物質収支を計測・解析し、その解析に基づいて、植物栽培棚群落の正味光合成速度、暗呼吸速度および蒸散速度を算定するシステムを用いて、それらの計測値から、電気エネルギー利用効率、光エネルギー利用効率、水利用効率を算定できるように

した。この研究成果は、Springer 社発行の学術書 Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production の改定第 2 版の Chapter として公表した。

(4) 他に、発芽後のレタスの生育を複数カメラで撮影し、SfM (Structure from Motion)法により 3 次元画像化した。2021 年 4 月時点でこの研究結果はほんの 1 部分しか印刷公表されていない。

(5) なお、本研究成果を、2019 年と 2020 年には、英語で各 2 回、講演および講義した。

(6) なお、2021 年 4 月現在、結球野菜（キャベツ）の人工光下栽培および収穫後研究野菜への緑色光照射が結球葉の色、化学成分などに及ぼす影響に関する投稿論文をとりまとめ中である。

(7) 上述以外の研究成果を、2021 年 3 月末までに、原著論文 1 報および Elsevier 社から出版予定の英文書籍 Plant Factory: Basics, Applications and Advances (Eds. T. Kozai, G. Niu and J. Masabni) の 1 つの Chapter として取りまとめたので、2021 年の秋には出版される予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S.Saengtharatip, J.Joshi, G.Zhang, M.Takagaki, T.Kozai and W.Yamori	4. 巻 59
2. 論文標題 Optimal Light Wavelength for a Novel Cultivation System with a Supplemental Upward Lighting in Plant Factory with Artificial Lighting.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environment Control in Biology	6. 最初と最後の頁 21, 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2525/ecb.59.21	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 E. Hayashi, Y. Amagai, T. Maruo and T. Kozai.	4. 巻 10
2. 論文標題 Phenotypic Analysis of Germination Time of Individual Seeds Affected by Microenvironment and Management Factors for Cohort Research in Plant Factory.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 agronomy(MDPI)	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agronomy10111680	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 T. Kozai, E. Hayashi, Y. Amagai	4. 巻 1273
2. 論文標題 Plant factories with artificial lighting (PFALs) toward sustainable plant production.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Horticulturae	6. 最初と最後の頁 251-259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17660/ActaHortic.2020.1273.34	査読の有無 有
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 S. Saengtharatip, N. Goto, T. Kozai, W. Yamori	4. 巻 1273
2. 論文標題 Green light penetrates inside crisp head lettuce leading to chlorophyll and ascorbic acid content enhancement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Horticulturae	6. 最初と最後の頁 261-269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17660/ActaHortic.2020.1273.35	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Jinxu Song; Lin Xu; Dongxian He; Satoru Tuskagoshi; Toyoki Kozai; Yutaka Shinohara	4. 巻 12(2)
2. 論文標題 Estimating EC and ionic EC contribution percentage of nutrient solution based on ionic activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IJABE(International Journal of Agricultural and Biological Engineering)	6. 最初と最後の頁 42-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25165/j.ijabe.20191202.4399	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 該当する

1. 著者名 Toyoki Kozai	4. 巻 12(5)
2. 論文標題 Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs) for achieving SDGs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IJABE (International Journal of Agricultural and Biological Engineering)	6. 最初と最後の頁 28-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25165/j.ijabe.20191205.5177	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 古在豊樹; 浦勇和也; 甲斐剛//林絵里	4. 巻 94(8)
2. 論文標題 人工光型植物工場に関する生産性指標の種類、定義、計算式および注釈	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業および園芸	6. 最初と最後の頁 661-672
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 古在豊樹	4. 巻 3(14)
2. 論文標題 人工光型植物工場の研究課題と展望	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 26-30
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 古在豊樹	4. 巻 95(2)
2. 論文標題 人工光植物工場研究に関する展望	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業および園芸	6. 最初と最後の頁 181-185
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 Fasil Tadesse Tewolde, Kouta Shiina, Toru Maruo, Michiko Takagaki, Toyoki Kozai and Wataru Yamori	4. 巻 2018
2. 論文標題 Supplemental LED inter-lighting compensates for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunshine	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0206592	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 該当する

1. 著者名 T.Kozai	4. 巻 1227
2. 論文標題 Benefits, problems and challenges of plant factories with artificial lighting (PFALs): a short review	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Horticulturae 1227(GreenSys 2017)	6. 最初と最後の頁 25, 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17660/ActaHortic.2018.1227.3	査読の有無 有
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 古在豊樹	4. 巻 105. 4
2. 論文標題 人工光植物工場-現況、背景、特徴および照明・自動化などの課題	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気総合誌オーム	6. 最初と最後の頁 39, 42
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 古在豊樹	4. 巻 181
2. 論文標題 巻頭言 人工光型植物工場の可能性と将来	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 施設と園芸	6. 最初と最後の頁 3
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 関山哲男、古在豊樹	4. 巻 71. 3
2. 論文標題 園芸施設用ヒートポンプの普及・拡大のための課題とその改善策-これまでの分科会活動内容のまとめ-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 農業電化	6. 最初と最後の頁 6, 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 古在豊樹、魯娜、長谷川陸央、雨谷弓弥子、布村伊、野崎友美、張ユウ、林絵理	4. 巻 2. 6
2. 論文標題 世界における人工光型植物工場の研究開発-課題と展望-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 29, 33
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 古在豊樹	4. 巻 2. 6
2. 論文標題 総論_人工光型植物工場の可能性と将来性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 6, 7
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21件（うち招待講演 17件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Modelling, simulation and AI technologies for plant factories with artificial lighting (PFALs). International meeting on high yield and highly efficient production in facility horticulture.
3. 学会等名 China Agriculture University (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Plant Factories with Artificial Lighting (PFAL) for Sustainable Agriculture.
3. 学会等名 Asian Horticultural Congress. Bangkok (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古在豊樹
2. 発表標題 日本における人工光型植物工場の中期以降の発展史 および今後の展望 - Covid-19以降を見据えて
3. 学会等名 植物工場研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古在豊樹
2. 発表標題 人工光型植物工場と生産性 中規模人工光植物工場の事業計画立案、経営のノウハウ.
3. 学会等名 植物工場研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Opportunities and Challenges for Plant Factory with Artificial Lighting (PFAL)
3. 学会等名 Seoul National University, International Symposium on Smart Plant Factory (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Global perspective of plant factory with artificial light (PFAL) for sustainable modern agriculture
3. 学会等名 BIOTEC Bangkok, International Symposium on Plant Factory (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古在豊樹
2. 発表標題 人工光型植物工場はどこに向かい、どう広がるのか? Perspectives of Plant Factory with Artificial Lighting (PFAL)
3. 学会等名 日本施設園芸協会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyoki Kozai
2. 発表標題 Perspective of Sustainable Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs)
3. 学会等名 中国農業大学 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyoki Kozai
2. 発表標題 Designing the Next Generation Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs)
3. 学会等名 IB-CAS, CPFA, Sanan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古在豊樹
2. 発表標題 人工光型植物工場による持続的発展への貢献
3. 学会等名 日経 AG/SUM (Agritech & Foodtech Summit), (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古在豊樹
2. 発表標題 人工光型植物工場と生産性
3. 学会等名 植物工場研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Smart Plant Factories: LEDs, Artificial Intelligence and Phenotyping
3. 学会等名 CAAS 2018 International Forum on Protected Horticulture (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 The present and future of plant factories with artificial lighting (PFALs)
3. 学会等名 SAAS 2018 SHANGHAI INTERNATIONAL INDOOR PLANT FACTORY SYMPOSIUM (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Saengtharutip, N. Goto, T. Kozai, and W. Yamori
2. 発表標題 Green light penetrates inside crisp head lettuce leading to chlorophyll and ascorbic acid content enhancement
3. 学会等名 ISHS International Horticultural Congress 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai, and E. Hayashi
2. 発表標題 Towards Sustainable Smart Plant Factories with LEDs, Artificial Intelligence and Phenotyping
3. 学会等名 ISHS International Horticultural Congress 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Challenges and opportunities for the next generation plant factories with artificial lighting (PFAL)
3. 学会等名 CAAS The second international symposium on plant factory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Challenges for plant factory with LED lighting
3. 学会等名 SSLCHINA 2018 International Forum on Solid State Lighting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 人工光植物工場に求められるフェノタイピング
3. 学会等名 日本学会議 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Basics, Principle, Structure and Environmental Control of Plant Factory with Artificial Lighting
3. 学会等名 Maejo University, International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Design and Operation of LED Lighting System for Plant Factory with artificial lighting (PFAL)
3. 学会等名 Maejo University, International Symposium Thailand (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kozai
2. 発表標題 Challenges for sustainable plant factories with LED lighting
3. 学会等名 Maejo University, International Symposium Thailand (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Toyoki Kozai Genhua Niu	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Academic press	5. 総ページ数 516
3. 書名 Plant Factory_Second edition	

1. 著者名 T. Kozai	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 456
3. 書名 Smart Plant Factory	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------