

令和元年6月10日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K07662

研究課題名(和文)速度変数計測を導入した植物工場の投入資源最適化環境制御に関する研究

研究課題名(英文) Optimization of resource supply rates for plant factory environment control by introducing rate variable measurement

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：人工光型植物工場における速度変数(量の時間変化を表わす変数)の計測に基づいて、資源(電気エネルギー、光エネルギー、水、二酸化炭素、肥料、栽培空間など)の投入速度を資源利用効率および資源量生産性の面から最適化する方法を検討した。その結果、栽培室内の植物群落の正味光合成(二酸化炭素吸収)速度、暗呼吸速度、吸水速度のそれぞれをエネルギー・物質収支式にもとづいて算定できた。本研究の成果に基づいて、人工光型植物工場に適した環境制御の考え方と研究方法論の考察を進めた。本研究成果の一部は、Smart Plant Factory (Springer社, 2018)のchapterとして掲載されている。

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安定的に高品質な植物を生産するシステムであるが、初期設備と運転のコストが高いことが問題となっている。本研究では、投入資源に関する速度変数と植物の反応速度を連続的に計測することにより、各資源の利用効率を算定することを可能にした。この成果に基づき、投入資源の利用効率を高め、投入資源の量とコストを削減し、さらには省資源で植物の成長を促進する方法が開発された。この方法を用いることにより、人工光型植物工場の生産性を向上させることで運転コストの削減が可能になり、商業的普及の理論的基礎の1つが構築できた。

研究成果の概要(英文)：Based on the measurement of rate variables with unit of time (supply rate of electricity, water, CO₂, etc. and rates of net photosynthesis, dark respiration, transpiration, etc.) in the plant factory with artificial light, a methodology of maximizing the plant growth using minimum amounts of resources was investigated. Rates of net photosynthesis, dark respiration and transpiration were estimated using equations of mass and energy balance for each resource element. This study explored the methodology of optimized environmental control for sustainable plant factories.

研究分野：植物環境工学

キーワード：人工光型植物工場 正味光合成速度 エネルギー・物質収支 光環境 表現型(フェノタイプ) 植物群落

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の世界的な異常気象、水資源不足、食料安定供給不安の中で、植物工場は、次世代の省資源型の高付加価値植物生産の一翼を担うと期待されている。また、植物工場は安心・安全な無農薬野菜の計画的・安定的な生産に有効であることが理解され、その省資源・環境保全的生产に期待が寄せられている。とは言え、省資源、生産性とその安定性、品質(健康)の向上の方法論が未確立で、さらなる生産性向上の余地は大きい。省力・省スペースなどの向上余地も大きい。また、地産地消の観点から、土地面積制約と交通渋滞が起きがちな大都市内での野菜生産による輸送・包装資源の削減需要も高まっている。したがって、植物工場の省資源的・環境保全的特性と問題点の解明の成果は、学術研究推進だけでなく、上述の社会問題の解決に貢献する。

2. 研究の目的

植物工場における資源(電気、光、水、CO₂、肥料、労働等)の時間当たり投入量に対する価値生産量(光合成量、収量、各種の歩留り、品質、販売価格)の比率(利用効率)を定量的に示す方法論を本研究において確立する。そして、大規模植物工場における投入資源量と価値産出量の連続的な計測値に基づき、各資源の利用効率と生産性の定量的な評価を行なう。さらに、資源利用効率向上のための方策を確立するために、エネルギー・物質収支の解析に加えてカメラ画像等も援用して植物生体重などを算定し、同時に投入資源のコストを算定する方法を確立する。人工光型植物工場の投入資源量と植物の正味光合成速度、吸水速度、蒸散速度、生体重増加速度、各種歩留り、CO₂施用速度等を連続測定した上で、申請者の既往研究業績を援用しつつ、投入・産出資源、植物成長に関する速度変数最適化制御を行う。

3. 研究の方法

植物工場環境に関わる状態変数(温度、湿度、CO₂濃度、養液のpH、イオン濃度など)と関連する速度変数(時間が単位を含む変数)であるCO₂施用速度、植物吸水速度等を連続的に測定し、エネルギー・物質収支式を用いて正味光合成速度、蒸散速度などの速度変数を非常条件下で連続的に算定する。それらの計測値と算定値から施用CO₂利用効率、水利用効率、ヒートポンプの冷房時成績係数(冷房能力/消費電力)などの指標値を算定する。それらの指標値、資源投入速度および資源産出速度(正味光合成速度、生体重増加速度等)から環境制御に必要な投入資源のコスト、資源投入による価値創出量、両者の比(コスト・パフォーマンスすなわち生産性)を算定する。必要なセンサー類の設置を行ない、データ収集を開始した後に、それらの計測値の解析を行い、環境制御ソフトウェアアルゴリズムの一部の開発も手掛ける。またカメラ画像と光環境・空気分布の測定・解析を予備的におこなう。上述の結果を、太陽光型植物工場と比較する。上述の研究の学術的方法論と成果は英語の学術論文と書籍で示す。

4. 研究成果

人工光型植物工場における速度変数(量の時間変化を表わす変数)の計測に基づいて、資源(電気エネルギー、光エネルギー、水、二酸化炭素、肥料、栽培空間など)の投入速度を資源投入、企業経営および資源量生産性向上の面から最適化する方法を検討した。上記の各種資源の投入速度は十分な精度で計測することが可能となり、その結果として、栽培室内の植物群落の正味光合成(二酸化炭素吸収)速度、暗呼吸速度、吸水速度のそれぞれをエネルギー・物質収支式にもとづいて、精度良く算定することができた。ただし、養液栽培中の各種イオンの吸収速度は本研究では対象とせず、今後の課題とした。

他方、植物群落のフェノタイプとも呼ばれる表現型(群落構造、葉面積指数、生体重、乾物重、クロロフィル濃度、クロロフィル蛍光など)を波長感度が異なる各種カメラ(可視カメラ、熱画像カメラ、暗視カメラ、近赤外カメラ、クロロフィル蛍光カメラなど)を用いた非接触・遠隔連続計測と解析は部分的に達成できたにとどまった。

本研究を通じて、従来の植物生理生態学研究成果は人工光型植物工場の生産場面では応用しにくい面が明らかになったので、照明システム、光合成環境および正味光合成速度の相互関係に関して、人工光型植物工場に適した考え方と研究方法論の考察を進めた。本研究の環境最適化および光環境に関する提案一部は、Springer社から出版されたSmart Plant Factory(全456ページ、Editor Toyoki Kozai)のchapterとして掲載されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計22件)

1. 古在豊樹 2018 総論_人工光型植物工場の可能性と将来性 アグリバイオ 2(6) 6-7
2. 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 2018 世界における人工光型植物工場の研究開発-課題と展望- アグリバイオ 2(6) 29-33
3. 関山哲男、古在豊樹 2018 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-農業電化 71(3)
4. 古在豊樹 2018 巻頭言 人工光型植物工場の可能性と将来 施設と園芸 181 3
5. 古在豊樹 2018 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 電気総合

誌オーム 105 (4) 39-42

6. T. Kozai 2018 Benefits, problems and challenges of plant factories with artificial lighting (PFALs): a short review *Acta Horticulturae* 1227(GreenSys 2017) 25-30 査読有
7. Fasil Tadesse Tewolde, Kouta Shiina, Toru Maruo, Michiko Takagaki, Toyoki Kozai and Wataru Yamori 2018 Supplemental LED inter-lighting compensates for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunshine *PLOS ONE* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206592> 査読有
8. 古在豊樹 2017 植物工場 - その現状、背景、特徴、課題および可能性 - *ARDEC World Agriculture Now* Vol. 57 10-14
9. 関山哲男、古在豊樹 2017 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 改善策 2 ヒートポンプの電力利用効率を高める制御法 *農業電化* Vol. 70 No. 5 8-12
10. 関山哲男、古在豊樹 2017 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 *農業電化* Vol. 70 No. 4 6-12
11. 西村ユミ 太田喜久子 数間恵子 川口孝泰 古在豊樹 小松浩子 正木治恵 2017 これからの社会におけるケアサイエンスの構築を目指して 学術の動向 (日本学術協力財団) Vol. 22 No. 5 58-71
12. 古在豊樹 2017 植物工場研究に関する用語と単位 *植物環境工学* Vol. 29 No. 1 3-9 査読有
13. E. Goto, K. Fujiwara and T. Kozai 2017 Proposed Standards Developed for LED Lighting *Urban AgNews online Magazine* 16 73-75 Vol. 22 No. 5 58-71
14. 古在豊樹 2017 2020-2040 年の人工光型植物工場のイメージ *農業電化* Vol. 70 No. 1 11-15
15. 古在豊樹 岩崎泰永 後藤英司 関山哲雄 丸尾達 中野明正 2016 閉鎖型温室・閉鎖型太陽光植物工場の可能性と課題 *農業および園芸* Vol. 91 No. 12 1204-1214
16. 関山哲男、古在豊樹 2016 園芸施設の空調にヒートポンプを使用する場合のコスト削減に係る課題(第2報) *農業電化* Vol. 69 No. 3 6-10
17. 古在豊樹 2016 近代農法はどちらに向かってかわるのか *農業および園芸* Vol. 91 No. 4 421-426
18. F. T. Tewolde, M. Takagaki, T. Oshio T. Maruo T. Kozai and Y. Kikuchi 2016 Environmental impact of tomato production under different hydroponic systems XXIX International Horticultural Congress on Horticulture: Sustaining Lives, Livelihoods and Landscapes (IHC2014): 1112 63 467-471 査読有
19. F. T. Tewolde, Lu Na, K. Shiina, T. Maruo, M. Takagaki, T. Kozai and W. Yamori 2016 Nighttime Supplemental LED Inter-lighting Improves Growth and Yield of Single-truss Tomatoes by Enhancing Photosynthesis in Both Winter and Summer *Frontiers in Plant Science* 195 1-14 査読有
20. T. Kozai, C. Kubota, M. Takagaki and T. Maruo 2015 Greenhouse environment control technologies for improving the sustainability of food production_XXIX International Horticultural Congress on Horticulture: Sustaining Lives, Livelihoods and Landscapes (IHC2014): 1107 1-13 査読有
21. N. Lu, T. Nukaya, T. Kamimura, D. Zhang, I. Kurimoto, M. Takagaki, T. Maruo, T. Kozai and W. Yamori. 2015 Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season *Scientia Horticulturae* (Elsevier) 197 17-23 査読有
22. G. Zhang, S. Shen, M. Takagaki, T. Kozai and W. Yamori 2015 Supplemental Upward Lighting from Underneath to Obtain Higher Marketable Lettuce (*Lactuca sativa*) Leaf Fresh Weight by Retarding Senescence of Outer Leaves *Frontiers in Plant Science* Vol 6 1110 1-9 査読有

[学会発表](計 19 件)

1. 古在豊樹 人工光植物工場に求められるフェノタイピング 公開シンポジウム「先端的フェノタイピング技術の農作物生産への実装」 主催：日本学術会議 農学委員会 農業生産環境工学分科会ほか 2018
2. T. Kozai, E. Hayashi Towards Sustainable Smart Plant Factories with LEDs, Artificial Intelligence and Phenotyping 2018
3. Saengtharatip, N. Goto, T. Kozai, W. Yamori Green light penetrates inside crisp head lettuce leading to chlorophyll and ascorbic acid content enhancement International Horticultural Congress 2018 (ISHS) 2018
4. T. Kozai Plant Factory with LED Lighting: Its opportunities and challenges 14th China International Forum on Solid State Lighting 2016
5. T. Kozai Plant Factory: A Model for Agro Industry Innovation International Conference on Innovations and Applications of New Technologies to Improve Productivity 2016
6. T. Kozai Landless Farming: The Plant Factory Model Advanced Agribusiness Management Course for Executives and Managers organized by APO 2016
7. T. Kozai 人工光型植物工場の動向と将来性 中国ハーフ産業サミットフォーラム 2016
8. T. Kozai Application and commercialization of LEDs in plant factories and greenhouses 中国科学院半导体研究所学术報告庁 2016
9. T. Kozai Challenges for the Development of PFAL industry and Recent Research in Japan The 5th

International Plant Factory & Agriculture Facilities Exposition 2016

10. 古在豊樹 植物工場の現状とこれからの社会への貢献 オープンアカデミー千葉経済大学 2016
11. 古在豊樹 人工光型植物工場の課題と将来性 第 68 回日本生物工学会大会 2016
12. 古在豊樹 私のイメージする 2025 年と 2050 年の植物工場の姿 第 100 回植物工場勉強会「私の考える 21 世紀の植物工場」2016
13. 古在豊樹 人工光型植物工場の課題と将来性 平成 29 年度第 2 回アグリビジネス研究会 2016
14. 古在豊樹 「まちなか植物工場」の展開 具体例とその文化的・食料生産リテラシー的意義 公開シンポジウム「都市の公園や未利用空間を利用した都市農業の可能性」2016
15. T. Kozai Overview of Pant Factories with Artificial Lighting (PFAL) - Improvement and innovation towards sustainable societies - Indoor Ag-Con Asia 2016
16. T. Kozai Transplant Production using Closed Systems with artificial lighting and its Commercial Application-Its concept and commercial application- National Conference on Enhancing the Role of Mass Media Practitioners in Knowledge Transfer to Improve Agricultural Productivity and Farmers' Welfare 2015
17. T. Kozai Plant Production Management System for PFAL (plant factory with artificial lighting) Association for Vertical Farming 2015
18. T. Kozai Six Components in Controlled Environment Agriculture (CEA) The first International Conference on Controlled Environment Agriculture (ICCEA 2015) 2015
19. T. Kozai Role of Plant Factory with Artificial Lighting (PFAL) for Next Generation - Improvement and innovation toward the sustainable planet - International Symposium on Role and Contribution of Vertical Farming to Urban Agriculture and Future Life : Institute of Plant Science & Biotechnology Research Institute of Agriculture & Life Sciences 2015

〔図書〕(計 6 件)

1. D. He, T. Kozai, G. Niu, X. Zhang 2019 Light-Emitting Diodes Springer 600 pages
2. T. Kozai 2018 Smart Plant Factory Springer 456 pages
3. 古在豊樹 2016 人間と作物-採集から栽培へ- ドメス出版 302pages
4. T. Kozai, K. Fujiwara, E. S. Runkle 2016 LED lighting for Urban Agriculture Springer 454pages
5. MF Brandon, N. Lu, T. Yamaguchi, M. Takagaki, T. Maruo, T. Kozai, W. Yamori, 2016 The Handbook of Photosynthesis CRC Press 785 pages
6. T. Kozai, G. Niu, M. Takagaki 2015 Plant Factory_An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production Academic Press 445 pages

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：結球野菜の抽苔抑制方法及び結球野菜の内葉の緑化方法

発明者：矢守 航、古在豊樹、

権利者：同上

種類：特許

番号：2017-193332

出願年：2017

国内外の別：国内

取得状況(計 1 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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、研究者個人に帰属されます。