

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26660196

研究課題名(和文) 植物工場における空調・光制御・ダクト型植物栽培設備による省エネ型植物栽培法の開発

研究課題名(英文) Research and Development of Energy-Saving Cultivation Equipment (ESCE) on Closed Plant Factory with Artificial Light

研究代表者

赤林 伸一 (Akabayashi, Shin-ichi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70192458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では完全人工光型植物工場を対象にランニング時の省エネルギー化を目的とした省エネ型栽培設備の開発を行った。省エネ型栽培設備は光源に赤・青点光源のLEDを用いた箱型の栽培設備であり、内部を超高効率光反射材で覆うことによって、植物の光合成に用いられずに熱となる光を減少させ、照明用電力消費量だけでなく、工場内の空調用電力消費量の削減効果も得られる。更に栽培設備内部の換気効率を数値流体解析を用いて解析し、換気方法を最適化し、栽培設備を開発した。省エネ型栽培設備を用いることで、蛍光灯を光源に用いた従来の栽培設備と比較して、約半分の空調・照明用電力消費量で同等の収穫重量を得ることが可能である。

研究成果の概要(英文)：In this study, energy-saving cultivation equipment (ESCE) is developed to reduce running cost on closed plant factory with artificial light. Red and blue LED lights are used in ESCE. Inner surface of the ESCE is covered by light reflection materials of which efficiency is 99%. By decreasing the light becoming heat not being used for the photosynthesis of plants, the energy reduction effect is provided in not only the power consumption for illumination but also the power consumption for air conditioning in the factory. ESCE is designed using computational fluid dynamics. Plant cultivation experiments are performed. Weight of harvest plants and electric power consumption by the ESCE are compared with conventional plant cultivation equipment. The ESCE needs about a half electric power consumption to produce the same harvest weight compared with conventional equipment.

研究分野：建築・都市環境工学

キーワード：完全人工光型植物工場 省エネ型栽培設備 省エネルギー ランニングコスト 空調用電力消費量 照明用電力消費量

1. 研究開始当初の背景

近年、野菜等の安全性や食糧の通年計画生産、安定供給の観点により、自然環境から隔離された人工環境下で光、温湿度、気流速度、二酸化炭素濃度を制御し、高品質・高機能な植物を高密度で生産する手法として植物工場が注目されている。完全密閉人工光型植物工場は一定の収穫量で安定的に無菌・無農薬・ゼロペクレルな農作物を栽培可能である。しかし、「農林水産研究基本計画」で指摘されている通り、完全人工光型植物工場は従来の農業生産方法と比較して生産コストに課題があり、省エネによるコスト削減技術の確立は極めて大きな課題となっている。

一方、植物工場において栽培棚内の温熱・空気・光環境の制御は極めて重要である。一般に気温の低下により葉温が低下すると光合成速度が低下する。又、植物の周囲が高湿度状態となると蒸散作用が妨げられるため、光合成に必要な養分を根から水分と共に吸収することが困難となり、光合成速度と植物内の養分移動速度のバランスが崩れることで、植物のストレス応答及び生育障害等が発生する。更に、気流が停滞し、葉柄と茎の隙間に水滴が付着し続けた場合、カビ等の温床となるため、温湿度と共に気流速度分布の制御が重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では植物工場における植物栽培において最適な温熱・空気・光環境の形成と生産時の照明・空調用エネルギー消費量の削減を目的として、数値流体解析(CFD)により、空調・光制御・ダクト型植物栽培設備(省エネ型栽培設備)を開発し、空調・光制御・ダクト型植物栽培設備を用いた際の植物栽培方法を確立する。更に、従来の植物工場における植物栽培方法と電力消費量の比較を行うことで、植物生産時のエネルギーの削減効果の評価を行い、完全密閉人工光型植物工場における植物栽培に特化した照明・空調設備技術を開発する。

まず、省エネ型栽培設備を対象に数値流体解析(CFD解析)を用いて栽培設備モデル内の空気環境の解析を行う。栽培設備を対象とした植物周囲の風速分布、濃度分布(湿度・ O_2 ・ CO_2 濃度等)の解析を行い、植物の栽培に適した空気環境を形成するための制御方法を検討する。

次に、省エネ型栽培設備(栽培設備①)における赤青LEDの点灯個数をパラメータとした栽培実験を行う(実験①)。赤青LED照明の点灯個数の制御を行い、栽培用照明条件毎の照明用電力消費量の測定を行う。各実験で栽培用照明条件を変化させて電力消費量、リーフレタス収穫重量、生育日数等を比較する。少ない電力消費量で最も効率良くリーフレタスを栽培することが可能な赤青LED点灯個数を検討する。

更に、光源に蛍光灯を用いた従来型栽培設備(栽培設備②)と、省エネ型栽培設備により、

実際に植物生産(リーフレタス)行った際のコンテナ全体のエネルギー消費量(照明・空調等)の測定を行う(実験②)。各実験で栽培条件をパラメータとして電力消費量、リーフレタス収穫重量、生育日数等を比較し、省エネ型栽培設備によるコンテナ式植物工場全体でのエネルギー削減効果の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) CFD解析概要

表1にCFD解析条件を、図1に省エネ型栽培設備モデルの概要を示す。解析は汎用数値流体解析ソフトSTREAM Ver. 10を用い、乱流モデルはk-εモデルとする。栽培設備①内には給気口(50mm×50mm)と排気口(10mm×460mm)を設け、給気口にはファンを設置する。吹出風速は2.0m/sとする。排気口は栽培設備の側面に1箇所設ける。解析caseは給気口の数と排気口の位置を変化させた以下の計4caseとする。給気口を2箇所とし排気口を側面上部に設置した場合(case1)、側面下部に設置した場合(case2)、給気口を4箇所とし排気口を側面上部に設置した場合(case3)、側面下部に設置した場合(case4)とする。植物モデルの高さは125mmとし、トレーサガス(O_2 ・水蒸気等)を発生させる位置は植物モデルの中心とする。解析結果をcase毎に比較し、栽培設備モデル内を効率良く換気することが可能な空調方式の検討を行い、省エネ型栽培設備を開発する。

表1 CFD解析条件

標準k-εモデル	
差分スキーム	全てQUICK
解析領域	600[mm]×600[mm]×600[mm]
解析メッシュ数	3,227,584=232(x)×188(y)×74(z)
給気開口	50[mm]×50[mm](流量:18[m ³ /h])
排気開口	10[mm]×460[mm]
境界条件	流入 流入風速2.0[m/s]
	流出 表面圧力境界(表面圧力0.0[Pa])
	壁境界 流体と接する全ての面(空気、水) 対数則
温度	等温

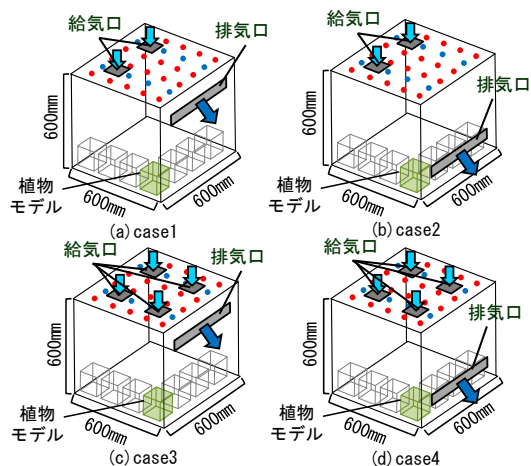


図1 省エネ型栽培設備モデルの概要

(2) 栽培実験の概要

① 実験室及びコンテナ式植物工場の概要

本実験ではコンテナ式植物工場を対象としてリーフレタスの栽培を行う。実験室内にコンテナ式植物工場を設置し、コンテナ周辺には LED 照明制御機器、データロガー、電力モジュール、実測用 PC、pH・EC 計、養液タンク、養液ポンプ、CO₂ボンベ、エアコン室外機、有圧換気扇を設置する。有圧換気扇で外気を実験室内に給気し外部環境を模擬する。なお給気風量は 3500[m³/h]、換気回数は 20[回/h]以上である。栽培実験期間中の外気と実験室の温度差は 1.5[°C]以下である。コンテナは内法幅 2.0[m]×長さ 4.0[m]×高さ 2.2[m]とし、熱損失係数は 1.9[W/m²・K]である。コンテナは海上輸送用を想定している。内部には省エネ型栽培設備(栽培設備①)と従来型栽培設備(栽培設備②)を設置する。

② 省エネ型栽培設備の概要

図 2 に栽培設備①の外観を、図 3 に栽培設備①の内部を示す。栽培時には明期と暗期を設ける。明期は植物に光を照射する時間(照明点灯時)であり、午後 5 時～午前 9 時(16 時間)とし、その他の時間を暗期とする。栽培棚には常時ポンプで培養液を循環させる。栽培設備①では、栽培棚の上・中・下段に 4 セットずつ計 12 セットの栽培設備を設置し、1 セットずつ内壁面の給気口と排気口を除く全ての面を H 社及び D 社製超高効率拡散反射材(全反射率 99[%])で覆う。各栽培設備(栽培パネル 1 枚)にはネットワークカメラを 1 つずつ設置し、リーフレタスの栽培状況を観察する。



図 2 栽培設備①の外観
赤青LED



図 3 栽培設備①の内部

③ 実験機器の概要

光環境の測定には分光放射照度計を用い、光強度は光合成有効量子束密度を指標とする。温熱空気環境の制御には家庭用エアコン、

除湿機、CO₂ボンベを用いる。温熱空気環境の実測にはデータロガー、T型熱電対、温湿度発信機、NDIR 式 CO₂濃度制御用モニターを用いる。栽培設備①の温度は排気口の中心付近で測定し、栽培設備②の温度は各栽培パネル中心上の照明からの距離 100[mm]付近、CO₂濃度はエアコン室内機の吸込口において測定する。

④ 赤青 LED の点灯個数制御実験の概要(実験①)

栽培設備①を使用し、栽培期間を 28 日間とした赤青 LED の点灯個数制御実験を計 2 回行う。表 2 に赤青 LED 点灯個数の概要を示す。各 case の照明条件を 2 セットずつ設置し、実験を行う。表中の各数値はそれぞれ照明条件における栽培設備① 2 セットの平均値である。

第 1 回実験では電力消費量は caseA(赤 20 個・青 4 個)が 55.6[W]、caseF(赤 10 個・青 2 個)が 28.3[W]となり、照明個数にほぼ比例して増加する。5 方向合計の光量子束密度は caseA(赤 20 個・青 4 個)が 1,993[μmol/(m²・s)]、caseF(赤 10 個・青 2 個)が 1,060[μmol/(m²・s)]となり、電力消費量と同様、照明個数にほぼ比例して増加する。

第 2 回実験では電力消費量は caseG(赤 20 個・青 8 個)が 67.7[W]、caseL(赤 5 個・青 1 個)が 16.2[W]となる。5 方向合計の光量子束密度は caseG(赤 20 個・青 8 個)が 2,497[μmol/(m²・s)]、caseL(赤 5 個・青 1 個)が 521[μmol/(m²・s)]となる。

第 1 回、第 2 回ともに実験期間中の明期の CO₂濃度は 1,500~2,100[ppm]に制御する。また、各栽培棚の温度は 20~25[°C]に制御する。各照明条件で 28 日間のリーフレタス栽培実験を行い、電力消費量及び収穫重量から単位照明用電力消費量当たりの収穫重量を求め、リーフレタスを最も効率良く栽培することが可能な赤青 LED 点灯個数を検討する。

表 2 赤青 LED 点灯個数の概要
(a) 第 1 回実験

栽培用照明条件	caseA	caseB	caseC	caseD	caseE	caseF
照明個数[個]	赤LED	20	15	15	10	10
	青LED	4	5	3	5	3
消費電力[W]	55.6	46.1	41.8	35.7	31.5	28.3
光量子束密度 [μmol/(m ² ・s)]	上方向	464	378	353	281	263
	5方向合計	1993	1705	1590	1266	1150
赤・青色光の比率(R/B比)	6:1	4:1	5:1	3:1	4:1	6:1

(b) 第 2 回実験

栽培用照明条件	caseG	caseH	caseI	caseJ	caseK	caseL
照明個数[個]	赤LED	20	20	10	10	5
	青LED	8	4	3	1	5
消費電力[W]	67.7	55.6	31.5	26.5	28.9	16.2
光量子束密度 [μmol/(m ² ・s)]	上方向	555	464	263	233	181
	5方向合計	2497	1993	1150	986	848
赤・青色光の比率(R/B比)	3:1	6:1	4:1	14:1	1:1	5:1

⑤ 栽培設備①と栽培設備②を用いた栽培実験の概要(実験②)

栽培期間は通年とし、栽培設備①、②を用いてそれぞれ 28 日間のリーフレタス栽培実験を交互に行う。実験期間中の栽培棚の温度は 20~25[°C]に、明期の CO₂濃度は 1,500~

2, 100[ppm]に制御する。

表3に各栽培設備の照明用消費電力及び光量子束密度を示す。実験①の結果に基づき栽培設備①の栽培用照明条件は赤青LEDをそれぞれ10個・1個とする。栽培設備①の鉛直上面方向からの光量子束密度は光源の高さによらず207[$\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]であり、栽培設備の下面を除く5方向合計の光量子束密度は884[$\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]である。また、栽培設備②では各栽培パネルにおける照明の高さを植物の成長に合わせて栽培パネル面から150[mm]、300[mm]と2段階に調整する。栽培設備②の鉛直上面からの光量子束密度は光源の高さが150[mm]の時は230[$\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]、300[mm]の時は150[$\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]である。

表3 各栽培設備の照明用消費電力及び光量子束密度

栽培設備		栽培設備①	栽培設備②
栽培用照明条件		赤青LED (赤10個・青1個) ×12セット	蛍光灯 (FLR40W) ×24灯
消費電力[W]		318	1088
光量子束密度 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	鉛直上 面方向	207	230
	光源の高さ [mm]	300	150
5方向合計		884	-

4. 研究成果

(1) CFD 解析結果

図4に省エネ型栽培設備内におけるトレーサガス濃度分布を示す。濃度分布はcase1~4のいずれもトレーサガス発生量とファン4個の給気風量による完全拡散濃度で基準化して表示する。case1~4を比較すると、case4(給気口4箇所・排気口下部)が栽培設備モデル内排気口側の植物モデル周囲及び内部において、相対的に低い濃度分布が形成されている。

栽培設備内において植物から発生するトレーサガス(水蒸気等)が栽培棚内に滞ることなく、比較的効率良く換気されるのは給気口を4箇所、排気口を側面下部に設置するcase4の方式であると考えられる。

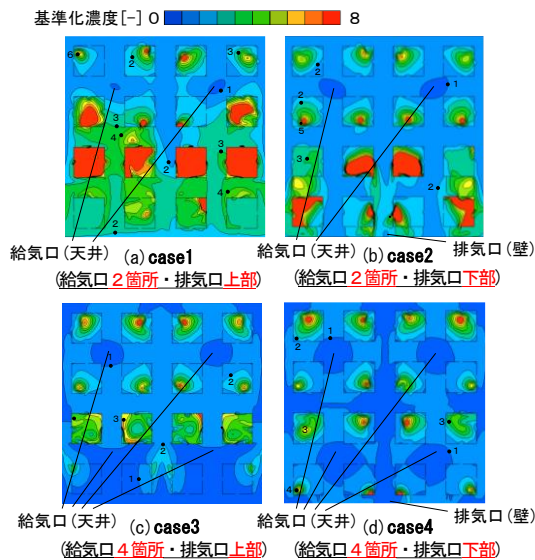


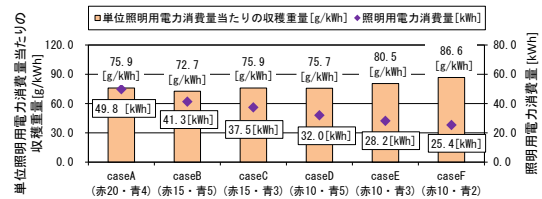
図4 省エネ型栽培設備におけるトレーサガス濃度分布

(2) 赤・青 LED の点灯個数制御実験結果(実験①)

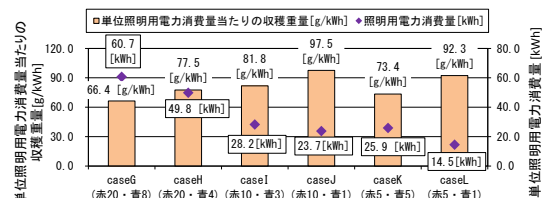
図5に単位照明用電力消費量当たりのレタス収穫重量を示す。第1回実験で最も単位照明用電力消費量当たりの収穫重量が多いのはcaseF(赤10個・青2個)の86.6[g/kWh]である。これは、照明用電力消費量がcaseFの約2倍であるcaseA(赤20個・青4個)の単位照明用電力消費量当たりの収穫重量と比較して約1.1倍となる。

第2回実験で最も単位照明用電力消費量当たりの収穫重量が多いのはcaseJ(赤10個・青1個)の97.5[g/kWh]である。これは照明用電力消費量がcaseJの約2倍であるcaseH(赤20個・青4個)の単位照明用電力消費量当たりの収穫重量と比較して約1.3倍となる。

全ての実験caseを比較すると、最も単位照明用電力消費量当たりのレタス収穫重量が多いのはcaseJ(赤10個・青1個)であり、97.5[g/kWh]となる。赤・青LED点灯個数制御実験より、赤・青LEDをそれぞれ赤10個・青1個点灯させることで最も効率よくリーフレタスを栽培することが可能であると考えられる。



(a) 第1回実験



(b) 第2回実験

図5 単位照明用電力消費量当たりのレタス収穫重量

(3) 従来型栽培設備と省エネ型栽培設備を用いた比較栽培実験結果(実験②)

図6にレタス収穫重量を示す。栽培設備①について各季節の値を平均すると、最大重量は約132.0[g/株]、平均重量は約94.2[g/株]、最小重量は約54.1[g/株]となる。栽培設備②の各季節における最大重量は約157.1[g/株]、平均重量は約109.3[g/株]、最小重量は約65.7[g/株]となる。どの季節においても栽培設備②の方が栽培設備①と比較して最大・平均・最小重量ともに多い。年間を通して、栽培設備②の最大・平均・最小重量は栽培設備①の約1.2倍となる。

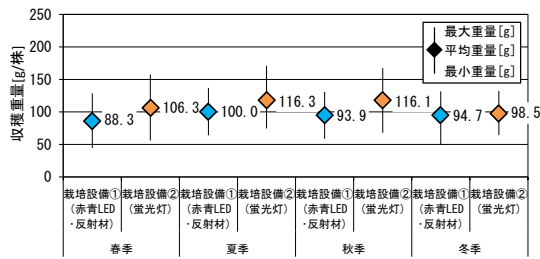
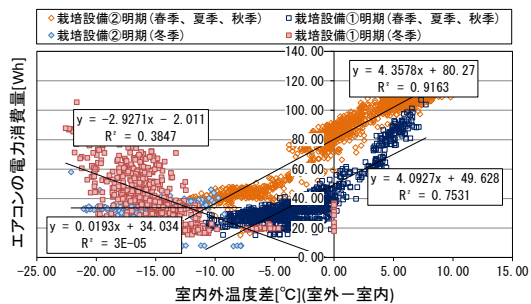
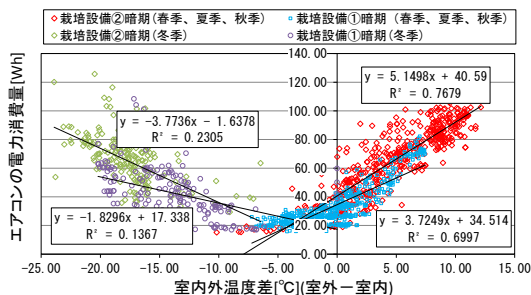


図6 レタス収穫重量

図7に実験期間中の1時間当たりの平均室内外温度差とエアコンの積算電力消費量の関係を示す。本実験ではコンテナ内のエアコンは栽培設備①では冬季に、栽培設備②では冬季の暗期に暖房を行い、その他は冷房を行う。明期の冷房時では、どの季節でもエアコンの電力消費量は室内外温度差にほぼ比例して多くなる。明期の室内外温度差が $-10\sim 10[^\circ\text{C}]$ の範囲では、栽培設備②を用いた場合と比較して栽培設備①を用いた場合では、1時間当たりの電力消費量は約20[Wh]減少する。また、図7(a)より、冬季に栽培設備②を用いた場合では明期に冷房稼働させるが、栽培設備②での室内発熱とコンテナからの貫流熱量がほぼバランスするため、暖房を行う栽培設備①と比較してエアコンの電力消費量が相対的に少ない傾向がある。



(a) 明期



(b) 暗期

※春季、夏季、秋季では栽培設備①、②ともにエアコンは冷房運転とする。冬季において栽培設備①では暖房運転、栽培設備②では明期に冷房運転を、暗期に暖房運転を行う。

図7 実験期間中の1時間当たりの平均室内外温度差とエアコンの積算電力消費量の関係

図8に総電力消費量と照明・エアコン・除湿機・循環用ファンの電力消費量を示す。各季節において栽培設備①の照明用電力消費量は栽培設備②と比較して平均で約70[%]減少する。エアコンの電力消費量はどの季節でも栽培設備①の方が少ないが、除湿機の電力消費量を含めた空調用電力消費量では春季、夏季、秋季においては栽培設備①の方が多い。これは室内発熱が相対的に少ない栽培設備①ではエアコンの冷房運転する時間が短くなるため、除湿機の処理する潜熱量が相対的に増加すること、更にエアコンより除湿機のCOPが低いためと考えられる。栽培設備①の生育期間の総電力消費量は、栽培設備②と比較して各季節で約21[kWh/区画]少なく、約半分となる。

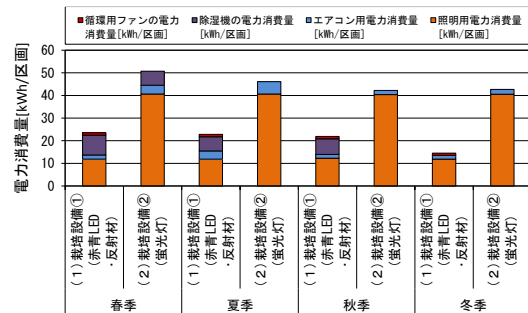
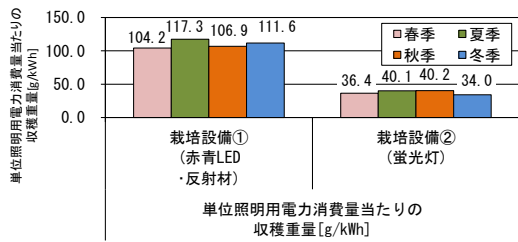


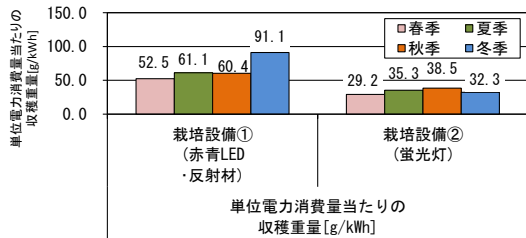
図8 総電力消費量と照明・エアコン・除湿機・循環用ファンの電力消費量

図9に各単位電力消費量当たりのレタス収穫重量を示す。栽培設備①の単位照明用電力消費量当たりの収穫重量(図9(a))は、各季節の平均では110.0[g/kWh]となる。栽培設備②の単位照明用電力消費量当たりの収穫重量は、各季節の平均では37.7[g/kWh]となる。栽培設備①の単位照明用電力消費量当たりの収穫重量は栽培設備②と比較して約2.9倍となる。栽培設備①の単位電力消費量当たりの収穫重量(図9(b))は各季節の平均では66.3[g/kWh]となる。冬季のみ単位電力消費量当たりの収穫重量が91.1[g/kWh]と比較的多いが、これは当該実験では除湿機を使用しなかったことで電力消費量が相対的に少ないためである。栽培設備②の単位電力消費量当たりの収穫重量は各季節の平均では33.8[g/kWh]となる。栽培設備①の単位電力消費量当たりの収穫重量は栽培設備②と比較して約2.0倍となる。

年間のリーフレタス栽培実験より、省エネ型栽培設備を用いることにより、年間を通して従来の栽培設備と比較して半分の電力消費量で同量以上の植物生産を行うことが可能であるとされる。



(a) 単位照明用電力消費量当たりの収穫重量



(b) 単位電力消費量当たりの収穫重量
図9 各单位電力消費量当たりのレタス収穫重量

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計8件)

- (1) 富岡誠子、赤林伸一、坂口淳、高野康夫、有波裕貴、佐藤好美：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その6 省エネ型栽培設備を用いた通年のエネルギー削減効果、日本建築学会大会学術講演会、2016年8月24日-2016年8月26日、福岡大学(福岡県・福岡市)
- (2) 佐藤好美、赤林伸一、坂口淳、高野康夫、有波裕貴、富岡誠子：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その5 省エネ型栽培設備の電力消費量と収穫重量の関係、日本建築学会大会学術講演会、2016年8月24日-2016年8月26日、福岡大学(福岡県・福岡市)
- (3) 坂口淳、赤林伸一、高野康夫、有波裕貴、佐藤好美：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その4 省エネ型栽培設備を用いた通年のエネルギー削減効果、日本建築学会北陸支部大会研究発表会、2016年7月23日-2016年7月24日、福井大学(福井県・福井市)
- (4) 佐藤好美、赤林伸一、坂口淳、高野康夫、有波裕貴：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その3 省エネ型栽培設備の電力消費量と収穫重量の関係、日本建築学会北陸支部大会研究発表会、2016年7月23日-2016年7月24日、福井大学(福井県・福井市)

- (5) 坂口淳、赤林伸一、高野康夫、有波裕貴：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その2 省エネ型栽培設備内の換気効率の解析結果と冬季におけるコンテナ式植物工場全体のエネルギー消費量の削減効果、空気調和・衛生工学会大会、2015年9月16日-2015年9月18日、大阪大学(大阪府・豊中市)
- (6) 富岡誠子、赤林伸一、坂口淳、高野康夫、有波裕貴、若月裕紀：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その4 冬季におけるコンテナ式植物工場全体のエネルギー消費量の削減効果、日本建築学会大会学術講演会、2015年9月4日-2015年9月6日、東海大学(神奈川県・平塚市)
- (7) 若月裕紀、赤林伸一、坂口淳、高野康夫、有波裕貴、富岡誠子：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その3 省エネ型栽培設備内の換気効率の解析結果、日本建築学会大会学術講演会、2015年9月4日-2015年9月6日、東海大学(神奈川県・平塚市)
- (8) 若月裕紀、赤林伸一、坂口淳、高野康夫、有波裕貴：完全人工光型植物工場を対象とした省エネ型植物栽培設備の開発研究 その2 省エネ型栽培設備内の換気効率の解析結果及び冬季におけるコンテナ式植物工場全体のエネルギー消費量の削減効果、日本建築学会北陸支部大会研究発表会、2015年7月11日-2015年7月12日、長岡造形大学(新潟県・長岡市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤林 伸一 (AKABAYASHI, Shin-ichi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70192458

(2) 研究分担者

中野 和弘 (NAKANO, Kazuhiro)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70188994

坂口 淳 (SAKAGUCHI, Jun)

新潟県立大学・国際地域学部・国際地域学科・教授

研究者番号：90300079