完全人工光型植物工場における省エネルギー型植物栽培設備の開発研究

コンテナ式植物工場における実栽培時のエネルギー削減効果に関する研究

加藤 めぐみ
指導教員　　赤林 伸一 教授

1 研究目的

近年、完全密閉環境下で人工照明を使用し、植物を無農薬・無菌栽培する完全人工光型植物工場が注目されている。しかし、植物工場は従来の農業生産方法と比較して生産コスト（照明・空調）が高く、省エネによるコスト削減が大きな課題である。

本研究では、省エネ型栽培設備①を新たに開発し、数値流体解析（CFD 解析）を用いて植物周囲の風速分布、濃度分布の解析※1を行い、各空調方式の換気効率の比較を行う。次に、開発した栽培設備①と蛍光灯を用いた従来型栽培設備②により、実際に植物生産（リーフレタス）を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）を測定し、省エネ型栽培設備によるエネルギー（コスト）削減効果の検討を行うことを目的とする。

2 解析概要

図１に栽培設備①モデルの概要を、表１にCFD解析条件を示す。解析は汎用数値流体解析ソフト STREAM Ver.10 を用いる。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。排気口は栽培設備①の側面に１箇所設ける。解析 case は、給気口を４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）とする。図２に植物モデルの概要を示す。トレーサーガス（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。CFD 解析結果の表示断面は栽培パネル上の高さ 75mm の水平断面とする。

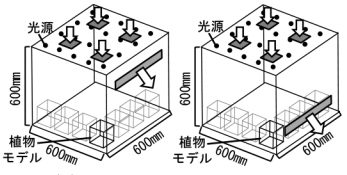
表１　CFD 解析条件

乱流モデル	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	サイズ: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		

3 実験概要

図３に栽培設備①の外観を、図４に栽培設備①の内部を、図５に栽培設備②の外観を示す。実験室内にコンテナ式植物工場※2、養液タンク、CO_2 ボンベを設置する。コンテナ式植物工場内には栽培棚、光・温熱空気環境の実測機器等が設置されている。栽培棚は３段とし、２種類設置する。光源として LED（赤 20 個、青８個）を用いた栽培設備①と蛍光灯（FLR40W）を用いた栽培設備②の２種類とする。栽培設備①は、内壁面の給気口と排気口を除く全てを超高効率反射材※3により覆う。各栽培設備における照明の高さは、植物の成長に合わせて栽培パネル面から 150mm, 300mm と段階的に高くする。栽培棚には明期※4と暗期を設け、常時、ポンプで培養液を循環させる。

光環境の実測には分光放射照度計※5を用いる。各栽培設備の光強度は光合成有効光量子束密度を指標とし、栽培設備①では、赤色・青色 LED 点光源をそれぞれ 20、4 個点灯させ、光源の高さがどちらの場合でも栽培パネル面を除く５面の測定結果の合計が 2,000μmol/(m^2・s) 程度である。栽培設備②では、光源の高さが 150mm, 300mm の場合で栽培面における上面からの光量子束密度はそれぞれ 230、150μmol/(m^2・s) 程度である。赤色光と青色光の比率（R/B 比）は 6:1 とする。温熱空気環境※6の制御には家庭用ルームエアコン、除湿機※7、実測にはデータロガー、熱電対、温湿度発信機、NDIR 式CO_2モニタを用いる。栽培設備毎の電力消費量、収穫重量、生育日数等から単位電力消費量当たりの収穫重量を求め、比較を行う。



(a) case1　(b) case2

図１　省エネ型栽培設備モデルの概要（栽培設備①）

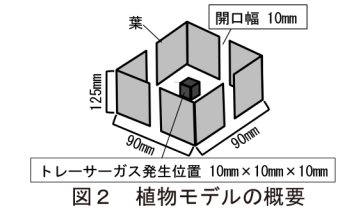


図２　植物モデルの概要

4 解析結果

図６に栽培設備①内のトレーサーガス濃度分布※8を示す。case1 と case2 を比較すると、case2（給気口４箇

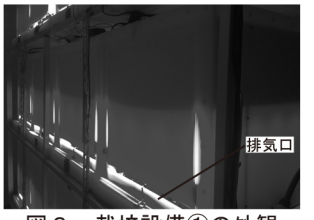


図３　栽培設備①の外観

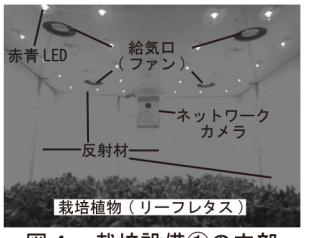


図４　栽培設備①の内部

図５　栽培設備②の外観

所・排気口下部）の方が植物モデル内部において、相対的に低い濃度分布が形成されている。

5　実験結果

図７に各栽培設備における平均温度及びコンテナ内の CO_2 濃度変化※9（１月１日）を示す。コンテナ周囲の気温を外気温と同等とするために、実験室に有圧換気扇（3,500m²/h、換気回数 20 回 /h 以上）を設置し、実験室内に外気を給気する。栽培棚の温度は 20 ～ 24℃に、明期※4 の CO_2 濃度は約 1,500 ～ 2,100ppm に制御されている（図７）。

図８に各栽培設備の１日当たりの照明及び循環用ファンの電力消費量を、図９に栽培設備①における日積算空調用電力消費量及びコンテナ内外日平均温度差を示す。栽培設備①（赤青 LED、超高効率反射材）と栽培設備②（蛍光灯）の１日当たりの電力消費量を比較すると、照明用電力消費量では栽培設備①（10.6kWh/ 日）の方が栽培設備②（15.1kWh/ 日）に比較して約 30％少ない。栽培設備①における期間平均空調用電力消費量は 0.7kWh/ 日である。

表２に栽培設備①におけるリーフレタス収穫重量及び生育期間※10 の総電力消費量を、図 10 に栽培設備①における生育期間中の日積算電力消費量を示す。生育期間における照明、空調、除湿機※7、循環用ファンの総電力消費量は、それぞれ 298.5kWh,22.0kWh,29.7kWh,13.0kWh（全体の 82％，６％，８％，４％）である。冬季で室内発熱とコンテナからの貫流熱量がほぼバランスしたため、空調用電力が相対的に少ない。今後季節毎における実験を行う必要がある。単位電力消費量当たりの収穫重量は 50.8g/kWh である。現在（１月 28 日）、栽培設備②においてリーフレタスの栽培実験を行っており、栽培設備①における栽培実験結果との比較を行う。

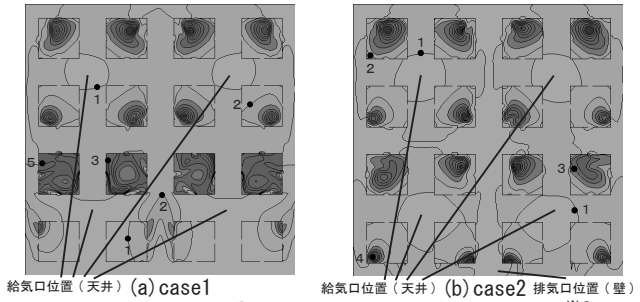


図６　栽培設備①内のトレーサーガス濃度分布※8

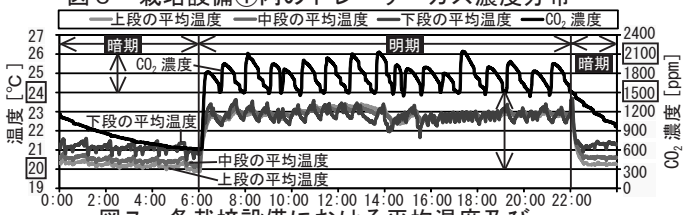


図７　各栽培設備における平均温度及び
コンテナ内の CO_2 濃度変化※9（１月１日）

6　まとめ

①栽培設備内において植物から発生するトレーサーガスが栽培棚内に滞ることなく、相対的に効率良く排気されるのは case2 の方式であると考えられる。

②栽培設備①の冬季における生育期間の照明、空調、除湿機※7、循環用ファンの総電力消費量は、それぞれ 298.5kWh,22.0kWh,29.7kWh,13.0kWh（全体の 82％，６％，８％，４％）である。

③栽培設備①の単位電力消費量当たりの収穫重量は 50.8g/kWh である。

※1　植物周囲が高濃度状態（湿度・O_2・CO_2 濃度等）となると植物に生育障害が発生し、特に葉柄部はカビ等の温床となるため、濃度分布を栽培植物に対して適正に保つ空気制御方法の検討が不可欠である。
※2　コンテナは内法 2.17m（幅）× 4.16m（長さ）× 2.36m（高さ）とし、熱損失係数は 1.9W/m²・K である。
※3　栽培設備内壁面にはＨ社製超高効率拡散反射材（全反射率 99％）を設置し、栽培パネル面にはＤ社製超高効率拡散反射材（全反射率 99％）を設置する。
※4　明期：植物に光を照射する時間（照明点灯時）。午前６時～午後 10 時（16 時間）とし、その他の時間を暗期とする。
※5　コニカミノルタ社製分光放射照度計（品番 :CL500A)。測定角は 10°とし、測定点は栽培パネルの中心とする。
※6　明期における温度と CO_2 濃度の目標値はそれぞれ 20 ～ 25℃、1,500 ～ 2,000ppm 程度とする。
※7　除湿機の稼働期間は１月４日午後４時 25 分～１月 13 日午前 10 時 15 分とする。
※8　濃度分布は case1,2 のいずれもトレーサー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。
※9　各栽培設備の温度は排気口の中心付近、CO_2 濃度はエアコン吸込み口付近において測定する。
※10　リーフレタス生育期間は 12 月 15 日午後 10 時～１月 13 日午前 10 時 15 分とする。

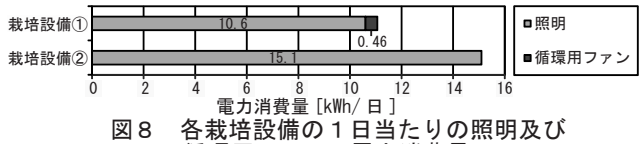
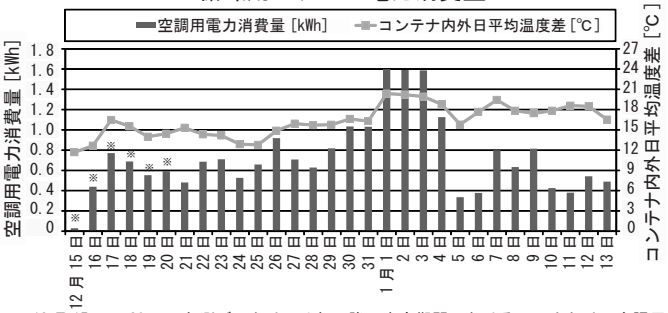


図８　各栽培設備の１日当たりの照明及び
循環用ファンの電力消費量



※ 12 月 15 日～ 20 日の欠測データは、それ以降の生育期間における１日当たりの空調用電力消費量とコンテナ内外日平均温度差の回帰式により補間する。

図９　栽培設備①における日積算空調用電力
消費量及びコンテナ内外日平均温度差

表２　栽培設備①におけるリーフレタス
収穫重量及び生育期間※10 の総電力消費量

栽培条件	省エネ型栽培設備
生育日数[日]	28
収穫株数[株]	192
最大重量[g]※	137.7
最小重量[g]※	73.1
平均重量[g]※	109.8
総重量[g]※	18447
変動係数[%]	14
照明用電力消費量[kWh]	298.5
空調用電力消費量[kWh]	22.0
除湿機※7の電力消費量[kWh]	29.7
循環用ファンの電力消費量[kWh]	13.0
電力消費量の合計[kWh]	363.2
単位照明用電力消費量当たりの収穫重量[g/kWh]	61.8
単位電力消費量当たりの収穫重量[g/kWh]	50.8

※最大重量、最小重量、平均重量、総重量は、各栽培条件で収穫した株の中で、重量が最も大きい方と最も小さい方からそれぞれ 12 株ずつを除いて算出した。

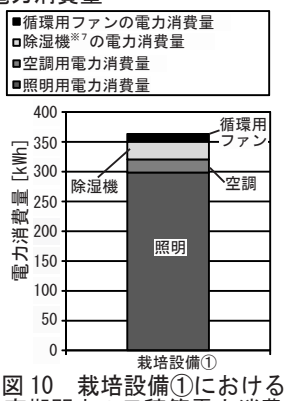


図 10　栽培設備①における
生育期間中の日積算電力消費量