

完全人工光型植物工場における省エネ型植物栽培設備の開発研究

若月裕紀

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。更に、植物周囲の風速分布により、植物から発生する水蒸気・ O_2 ・ CO_2 の濃度分布が栽培棚内に形成されるため、植物周囲の風速・濃度分布を栽培植物に対して適正に保つ空気環境制御方法の検討が不可欠である。

本研究では、光・空調制御ダクト型栽培設備を新たに開発し、数値流体解析（CFD 解析）で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、超高効率光反射材^{※1}を設置した光・空調制御ダクト型栽培実験装置を作成し、実際にリーフレタスの栽培を行い、栽培条件をパラメータとして電力消費量、収穫重量、生育日数等を比較し、省エネ型植物栽培設備の性能を評価することを目的とする。

2 解析概要

図1に植物モデルの概要を、図2に光・空調制御ダクト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 を用いる。ダクト内には給気口^{※2} 8箇所と排気口^{※3} 2箇所を設け、給気口にファンを設置する。case1では給気口を上面に設け、下向きに給気する。case2では給気口を側面に設け、横向きに給気する。排気口は両 case ともダクトの長辺側の

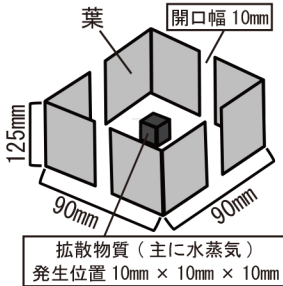


図1 植物モデルの概要

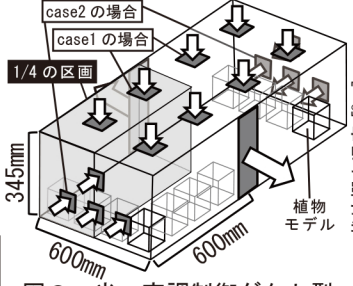


図2 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

両側面中央部に設ける。拡散物質（主に水蒸気）は植物モデル中心部から発生させる。

3 実験概要

図3に実験用栽培棚の外観を、図4に光・空調制御ダクト型栽培実験装置の内部を、図5に各栽培棚内の温度及び栽培室内の CO_2 濃度変化（12月15日）^{※4}を示す。栽培室内には栽培棚、養液タンク、育苗棚、光・温熱空気環境の制御・実測機器等が設置されている。栽培棚は3段とし、1段に2種類の栽培施設を設け、合計6種類の栽培条件を設定する。各栽培施設の照明には、蛍光灯（Hf32W）：caseA、直管型 LED：caseB、白色 LED：caseC、赤青 LED：caseD、赤青 LED（A 社製反射材）：caseE、赤青 LED（D 社製反射材）：caseF を用いる（図3）。光・空調制御ダクト型栽培実験装置は、ダクト内壁面の排気口を除く全てを超高効率光反射材により覆う（図4）。栽培棚には明期^{※5}と暗期を設け、常時、ポンプで培養液^{※6}を循環させる。養液は循環式 UV 殺菌灯^{※7}を用いて殺菌する。

光環境の制御には LED 電源ユニットを、実測には分光放射照度計^{※8}を用いる。各栽培条件の光強度は、光合成



図3 実験用栽培棚の外観

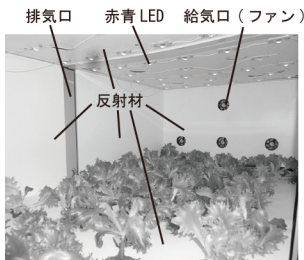


図4 光・空調制御ダクト型栽培実験装置の内部

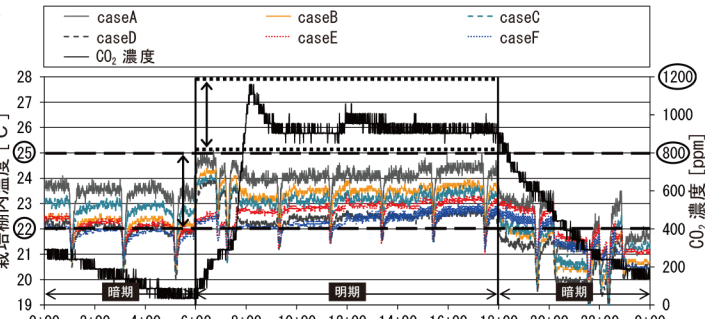


図5 各栽培棚内の温度及び栽培室内の CO_2 濃度変化（12月15日）^{※4}

有効光量子束密度を指標とし、caseA, Bは成り行き（それぞれ $130, 160 \mu \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度）、caseC, Dは上面から $200 \mu \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度、caseE, Fは栽培パネル面を除く五面の測定結果の合計を $200 \mu \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度とする。赤青LED（点光源）の赤色光と青色光の比率（R/B比）は1:1とする。温熱空気環境^{※9}の制御にはパッケージエアコン、CO₂ポンプ、循環式紫外線空気清浄機、送風機を、実測にはデータロガー、T型熱電対、温湿度発信機、CO₂濃度計を用いる。各栽培棚の温度は概ね22～25℃に制御されている。又、明期ではCO₂濃度は約800～1200ppmに保たれている（図5）。電力消費量の実測には電力量測定センサを用いる。

4 解析結果

図6に光・空調制御ダクト型栽培設備の風速分布（高さ40mm）^{※10}、図7に光・空調制御ダクト型栽培設備の拡散物質濃度分布（高さ40mm）^{※10, 11}を示す。case2に比較してcase1（天井から給気）の方が、植物周囲の濃度が低い。栽培設備ダクト内において、植物から発生する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case1と考えられる。

5 実験結果

図8に各栽培条件の1日当たりの電力消費量を示す。caseE, F^{※12}の電力消費量は、1日当たりの電力消費量が最も多い条件であるcaseAに比較すると約1/2である。

表1に各栽培条件の電力消費量及び収穫重量を示す。平均重量はcaseCが110g程度と最も多い。caseB, C, Dに比較してcaseE, Fでは、単位電力消費量当たりの収穫重量が11～18g/kWh（32～43%）程度少ない。これは、ダクト型栽培設備において、光量子束密度が光合成に必要な値に比較して不足していたこと、R/B比が適切でなかったこと、生育日数が長かったことが原因であると考えら

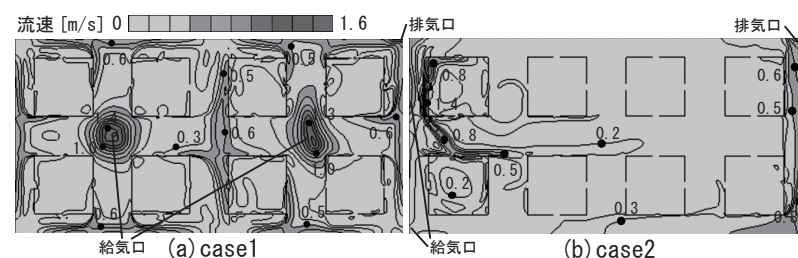


図6 光・空調制御ダクト型栽培設備の風速分布（高さ40mm）^{※10}

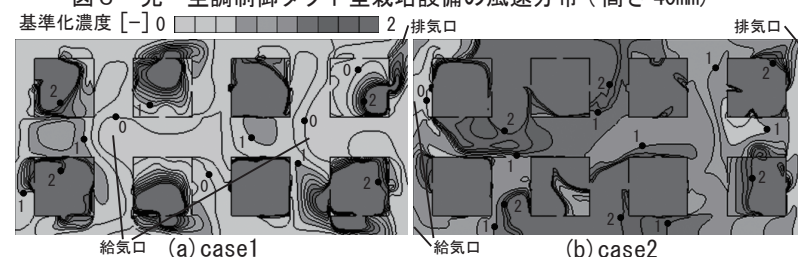


図7 光・空調制御ダクト型栽培設備の拡散物質濃度分布（高さ40mm）^{※10, 11}

れる。今後は、caseE, Fの照明用電力消費量をcaseDの1/2程度として上面からの光量子束密度を増加させる。更に、赤青LEDのR/B比を6:1程度として栽培実験を行い、引き続き省エネ型植物栽培設備の性能評価を行う。

6 まとめ

- ①光・空調制御ダクト型栽培設備の給気口を上面に設け、下向きに給気することによって、ダクト内において比較的効率良く水蒸気等を換気できる。
- ②赤青LEDに反射材を用いることで、1日当たりの電力消費量が最も多い条件であるcaseAに比較して、電力消費量を約1/2とできる。
- ③caseB, C, Dに比較してcaseE, Fでは、単位電力消費量当たりの収穫重量が11～18g/kWh（32～43%）程度少ない。これは、光合成に必要な光量子束密度が不足していたこと、R/B比が適切でなかったこと、生育日数が長かったことが原因であると考えられる。

注釈

- ※1 A社製高効率正反射材（全反射率95%）、D社製高効率拡散反射材（全反射率99%）
 ※2 給気口（50mm × 50mm）
 ※3 排気口（345mm × 50mm）
 ※4 温度は栽培棚の上4棚は栽培面上250mm、下2棚（光・空調制御ダクト型栽培実験装置）は排気口付近、CO₂濃度は栽培棚近傍において測定する。
 ※5 明期：植物に光を照射する時間（照明点灯時）。午前6時～午後6時（12時間）とし、その他の時間を暗期とする。
 ※6 水道水、養液栽培用肥料を用いて作成する。pH、EC（電気伝導率）、液温を管理する。
 ※7 UV殺菌灯の稼働時間は午後8時～午後10時30分（2時間30分）とする。
 ※8 コニカミノルタ社製分光放射照度計（品番：CL500A）。測定角は2°とする。
 ※9 明期における温度とCO₂濃度の目標値はそれぞれ、22～25℃、1000ppm程度とする。
 ※10 光・空調制御ダクト型栽培設備は線対称であるため、それぞれ1/4の区画で分布を示す。
 ※11 濃度分布は、拡散物質発生量とファンの流量により、完全拡散濃度で基準化して表示する。
 ※12 栽培開始後20日間は、照明用電力消費量をそれぞれ0.251kWh/日、0.228kWh/日とし、その後は0.353kWh/日、0.388kWh/日とした。

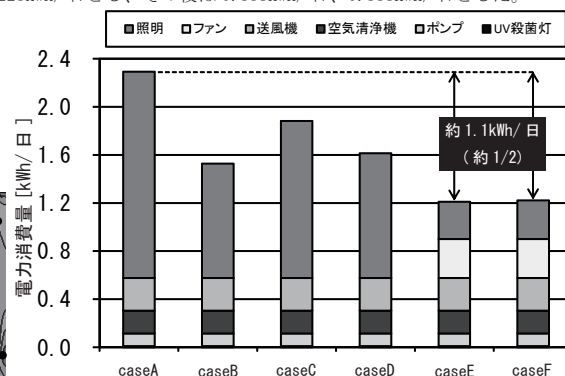


図8 各栽培条件の1日当たりの電力消費量

表1 各栽培条件の電力消費量及び収穫重量

	caseA	caseB	caseC	caseD	caseE	caseF
生育日数[日]	35	35	33	35	49	49
生育期間における電力消費量[kWh]	80.2	53.5	62.1	56.5	59.3	59.9
最大重量[g]	106	143	194	115	74.9	89.5
最小重量[g]	28.7	21.1	52.9	47.0	40.9	42.7
平均重量[g] [※]	71.6	86.0	110	83.6	60.2	60.4
総重量[g] [※]	1719	2064	2649	2005	1444	1451
標準偏差[g]	22.7	28.7	34.7	18.0	8.0	11.4
単位電力消費量当たりの収穫重量[g/kWh] [※]	21.4	38.6	42.6	35.5	24.3	24.2

※平均重量、総重量、単位電力消費量当たりの収穫重量は、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4株ずつを除いて算出した。