

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

T 1 1 K 6 6 7 B 加藤 めぐみ
指導教員 赤林 伸一 教授



図 S社の完全人工光型植物工場

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。



図 S社の完全人工光型植物工場

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。

植物工場の課題

従来の農業生産方法と比較して生産コスト(照明・空調)が高い。



省エネによるコスト削減が大きな課題。

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を行う。

※1 植物周囲が高濃度状態に(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。



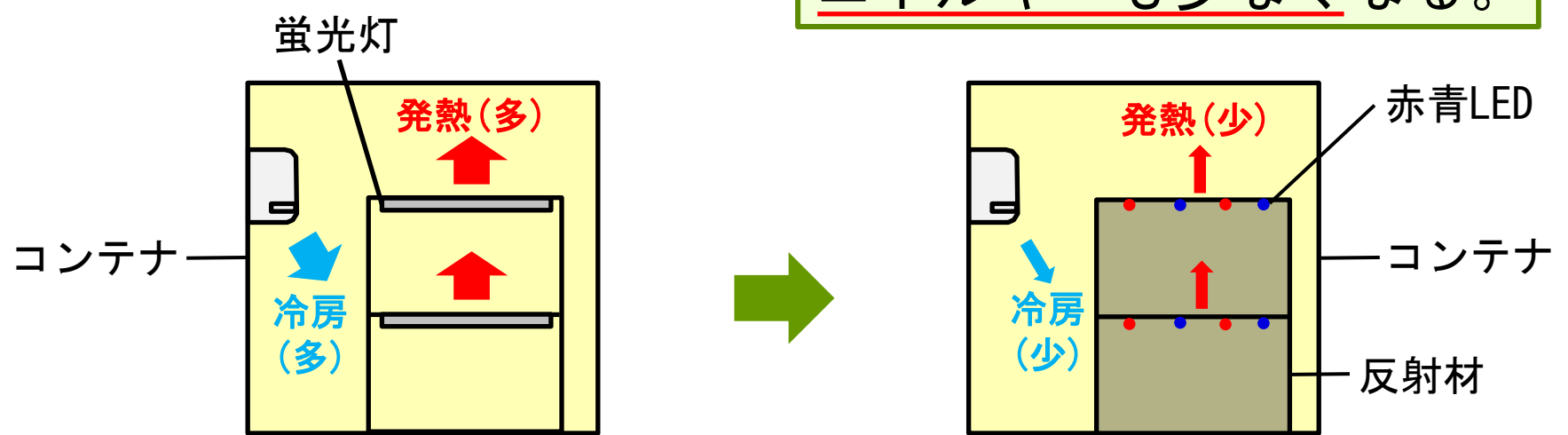
各空調方式の空調換気効率を比較する。

研究目的

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）を行う。

照明用エネルギーが大きい
ため発熱が多くなり、冷房用エネルギーも多くなる。

少ない照明用エネルギーで栽培を行うことが可能なため発熱が少なくなり、冷房用エネルギーも少なくなる。



(i) 従来型栽培設備 (栽培設備②)

(ii) 省エネ型栽培設備 (栽培設備①)

図 コンテナ式植物工場^{※2}のイメージ

※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。

研究目的

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）を行う。

植物生産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）削減効果を検討する。

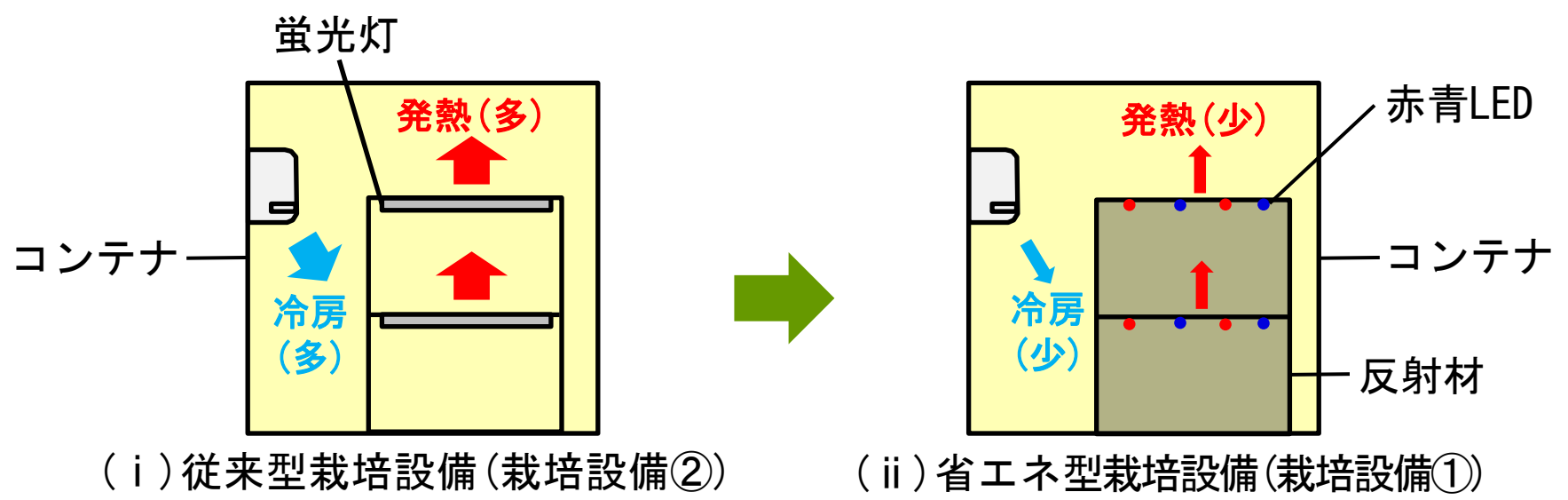


図 コンテナ式植物工場^{※2}のイメージ

※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。

解析概要

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内には給気口と排気口を
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。

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		

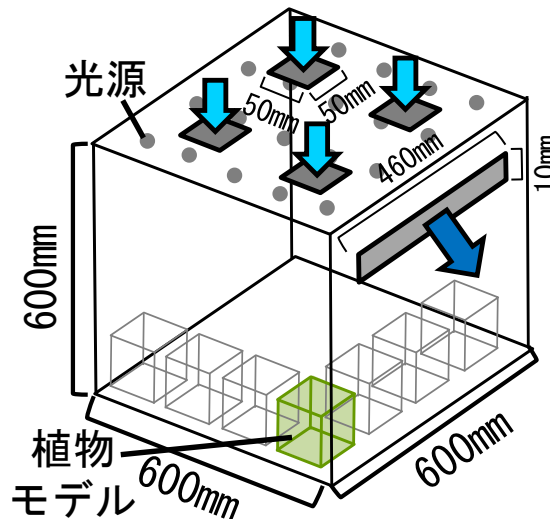


図 1 (a) 省エネ型栽培設備モデル
の概要 (栽培設備①)

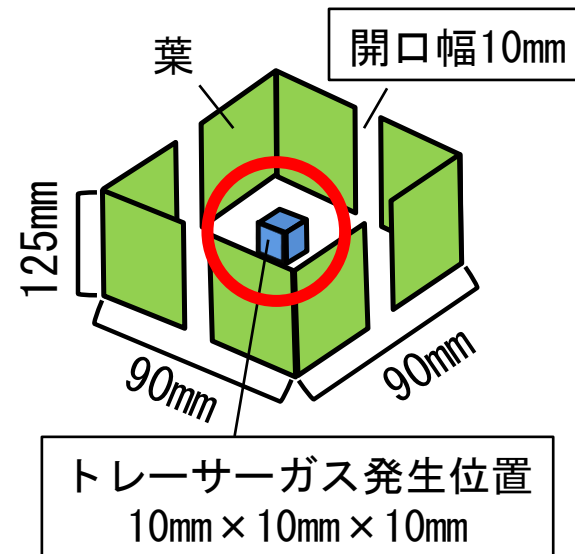
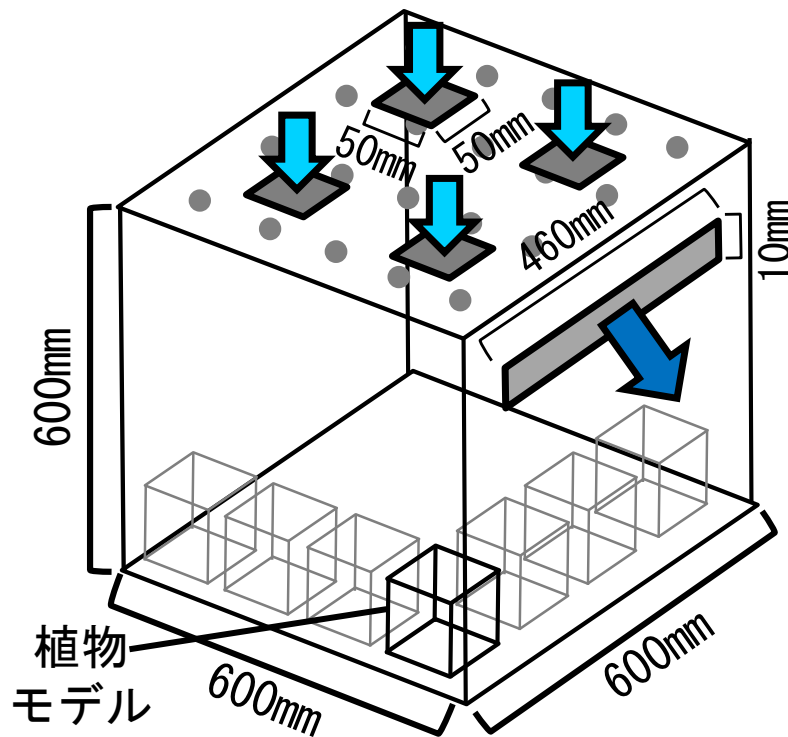


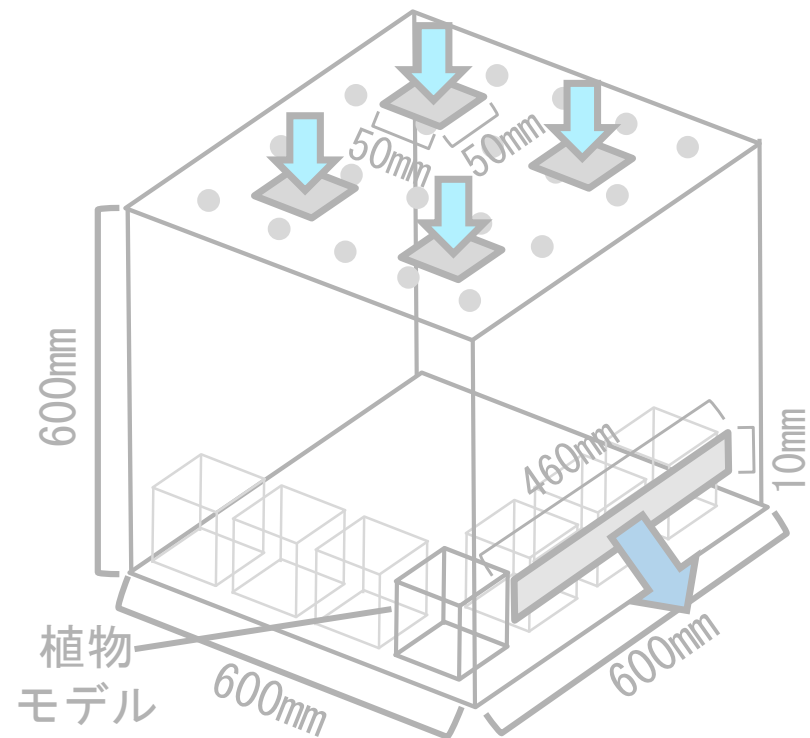
図 2 植物モデルの概要

解析概要

case1では給気口を4箇所、
排気口を上部に設置する。



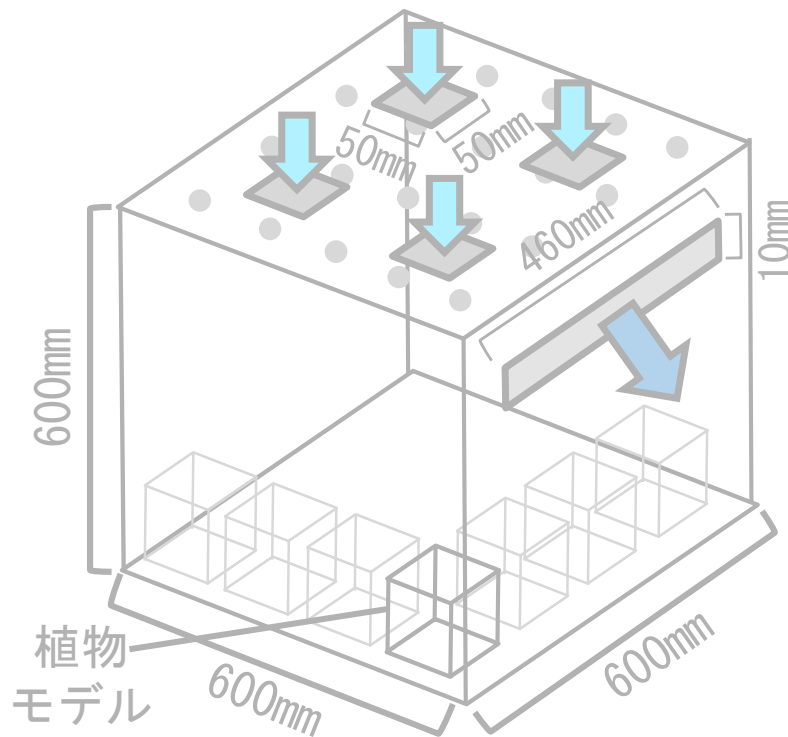
(a) case1



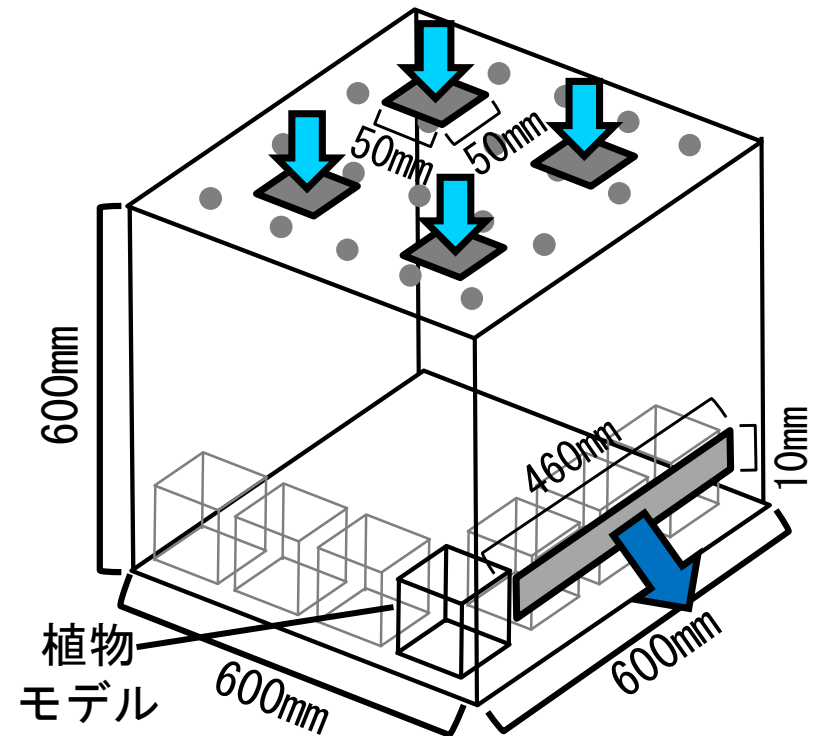
(b) case2

図1 省エネ型栽培設備モデルの概要(栽培設備①)

case2では給気口を4箇所、
排気口を下部に設置する。



(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)

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。

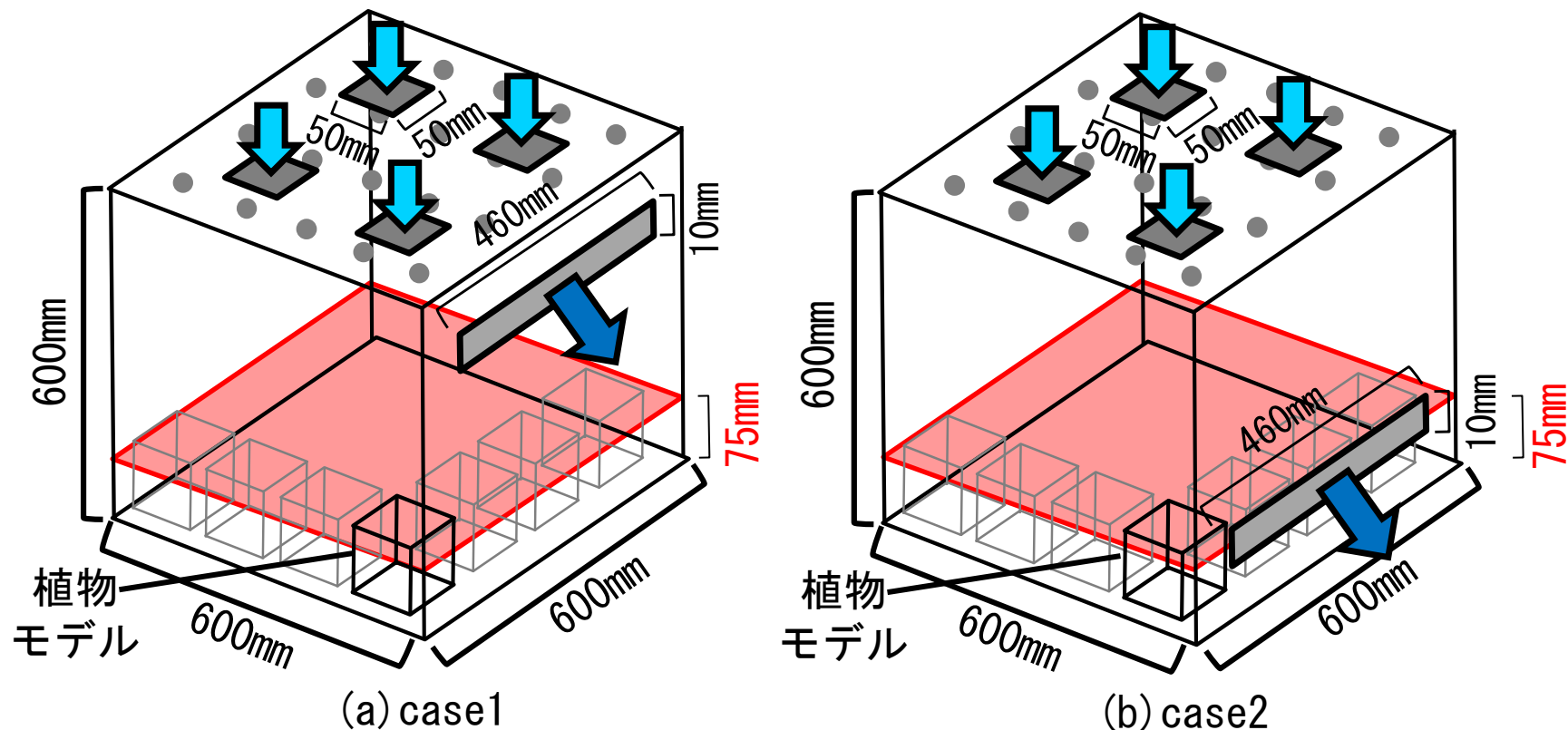


図1 省エネ型栽培設備モデルの概要(栽培設備①)

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。

※3 栽培設備内壁面にはH社製超高効率反射材(全反射率99%)を設置し、栽培パネル面にはD社製超高効率反射材(全反射率99%)を設置する。

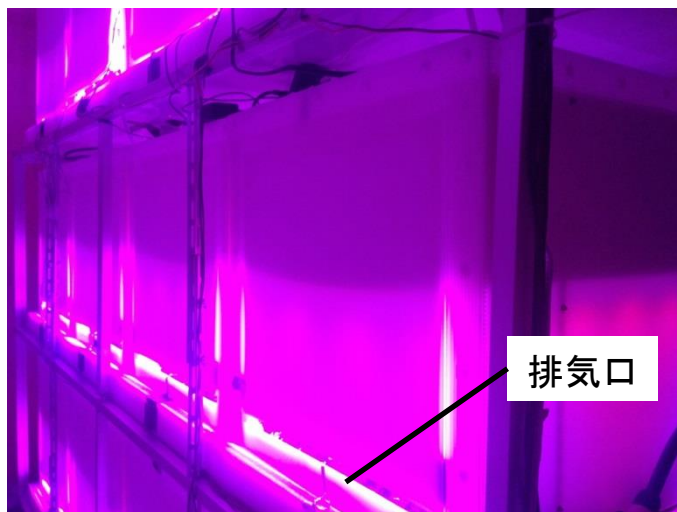


図3 栽培設備①の外観

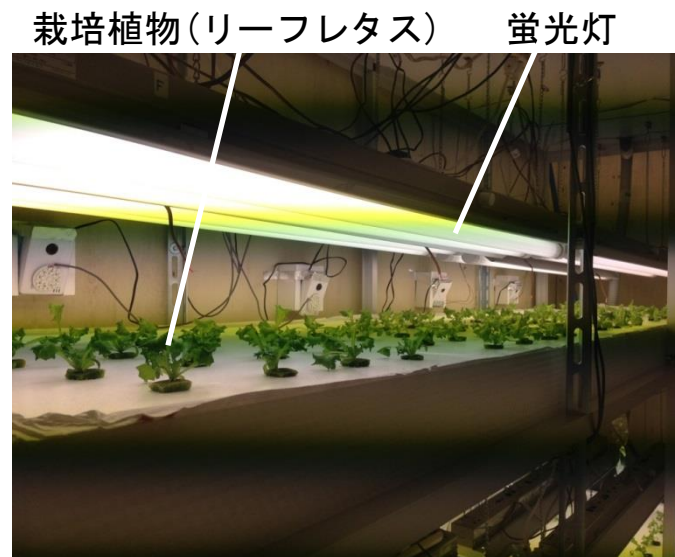


図5 栽培設備②の外観

実験概要

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。

※4 明期: 植物に光を照射する時間(照明点灯時)。栽培設備①では午前6時～午後10時(16時間)、栽培設備②では午後5時～午前9時(16時間)。

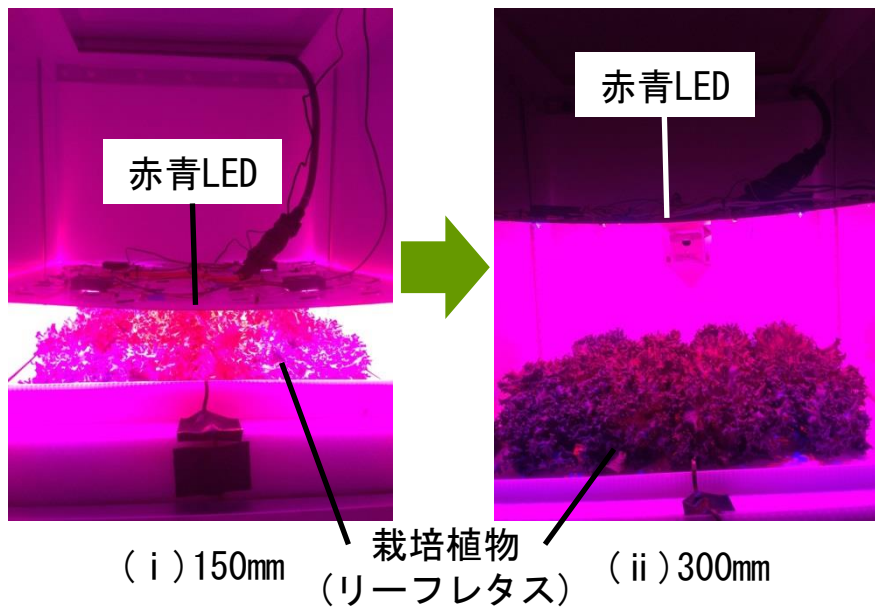


図 栽培設備①の外観

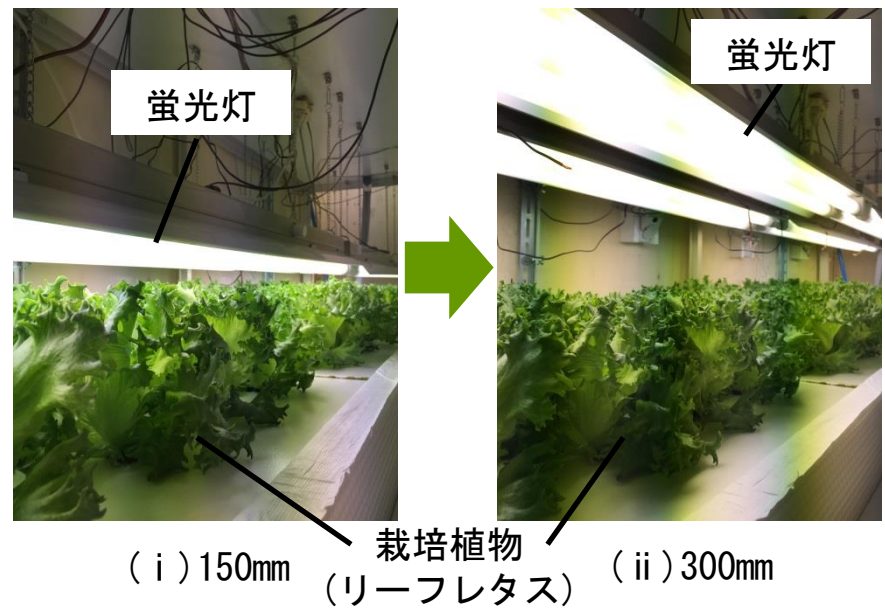


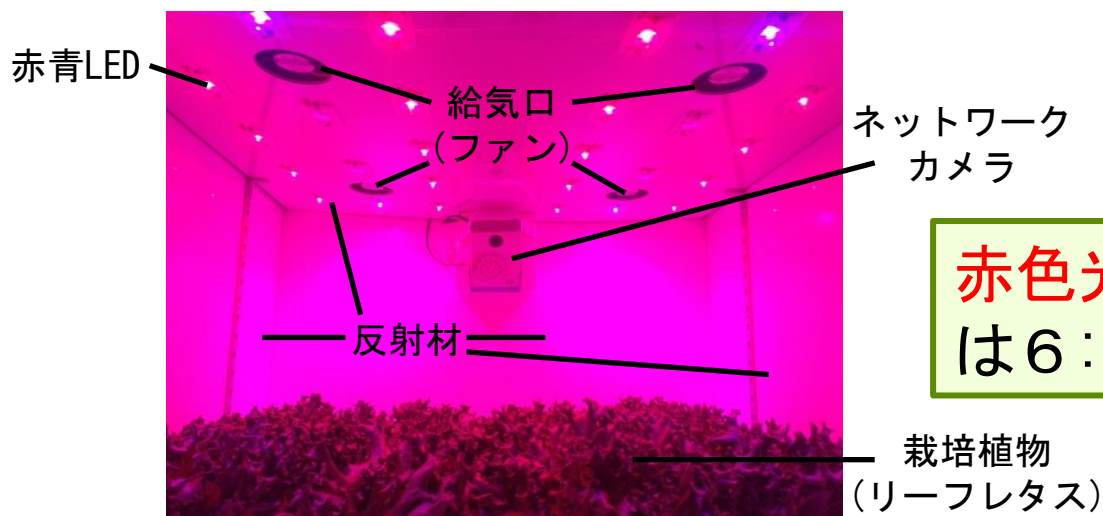
図 栽培設備②の外観

実験概要

各栽培設備の光強度は**光合成有効光量子束密度**を指標とする。

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を除く5面の測定結果の合計が $2,000\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度となる。

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、 $150\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度となる。



赤色光・青色光の比率 (R/B比)
は6:1とする。

図4 栽培設備①の内観

解析結果 (CFD解析結果)

case1 (給気口 4箇所・排気口上部) と case2 (給気口 4箇所・排気口下部) を比較すると、case2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。

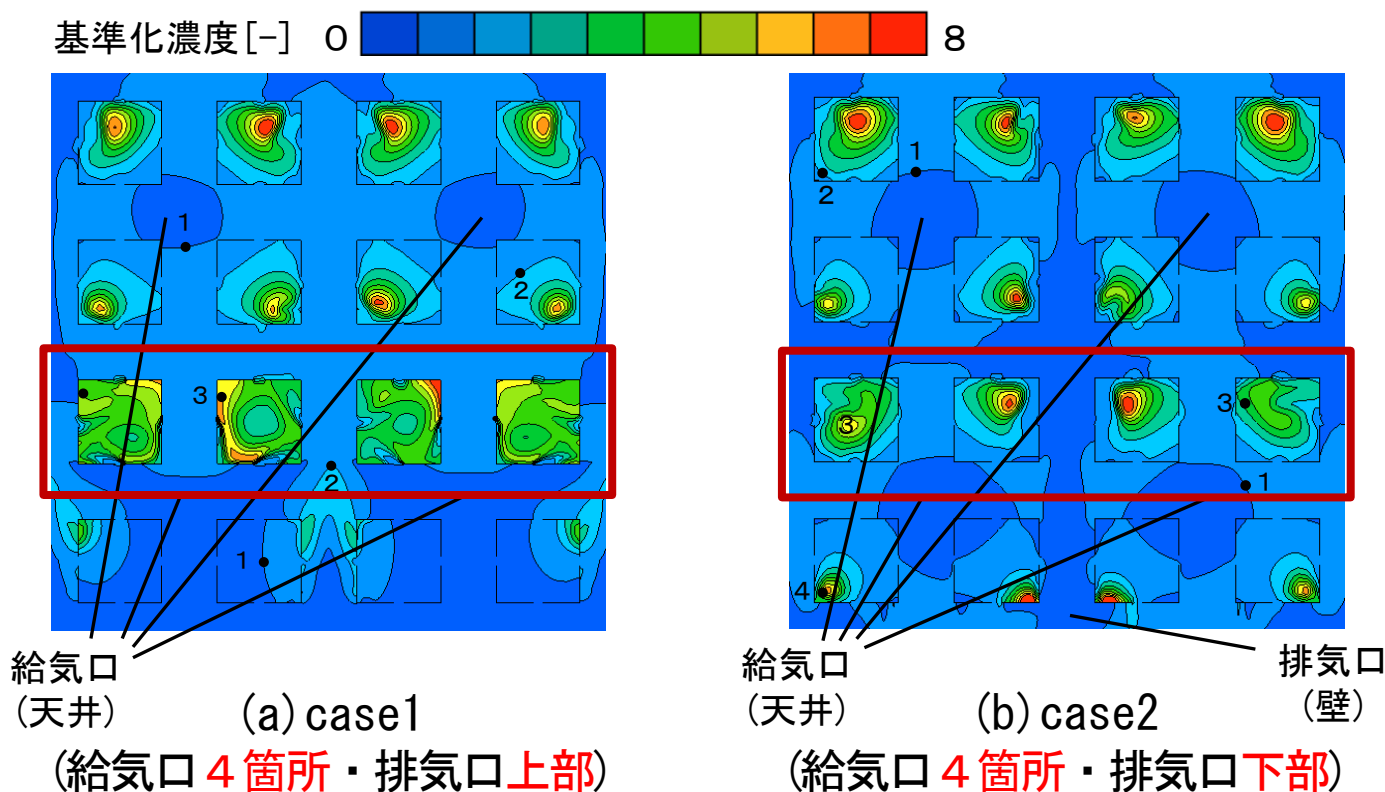


図6 栽培設備①のトレーサーガス濃度分布※8

※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。

実験結果

コンテナ周囲の温度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。

栽培設備①では栽培棚の温度は20~24°Cに、明期^{※4}のCO₂濃度は約1,500~2,100ppmに制御されている。

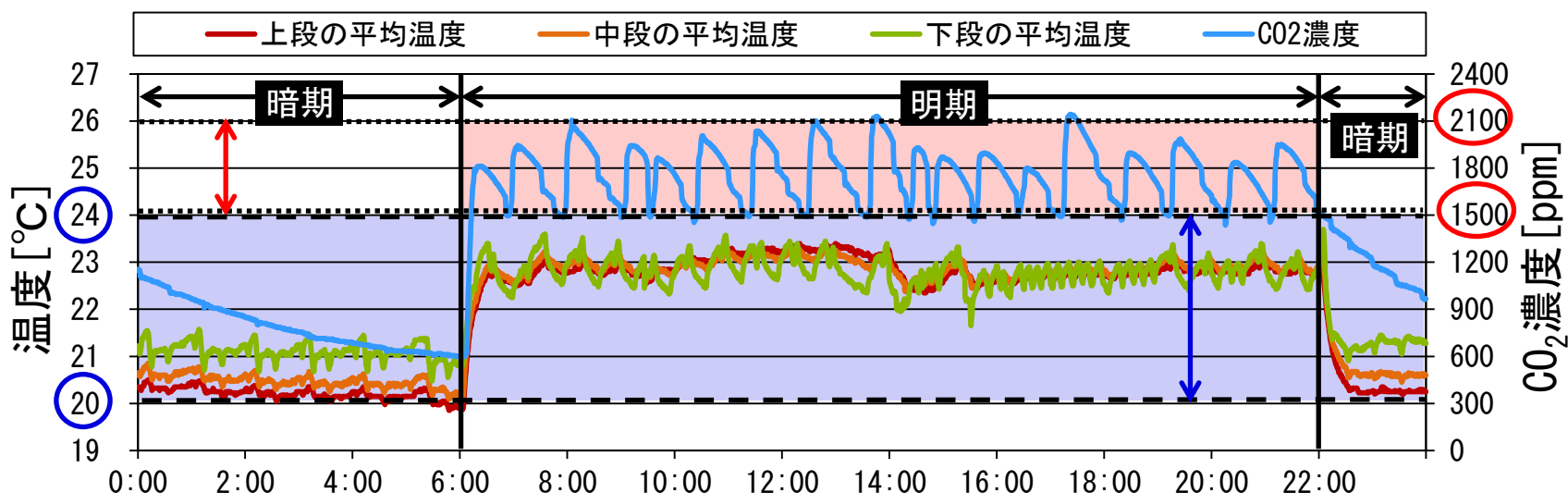


図 栽培設備①における平均温度及びコンテナ内のCO₂濃度変化^{※9}(1月1日)

※4 明期:植物に光を照射する時間(照明点灯時)。栽培設備①では午前6時~午後10時(16時間)、栽培設備②では午後5時~午前9時(16時間)。

※9 各栽培設備の温度は排気口の中心付近、CO₂濃度はエアコン吸込み口付近において測定する。

実験結果

コンテナ周囲の温度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。

栽培設備②では栽培棚の温度は19~23°Cに、明期※⁴のCO₂濃度は約1,500~2,100ppmに制御されている。

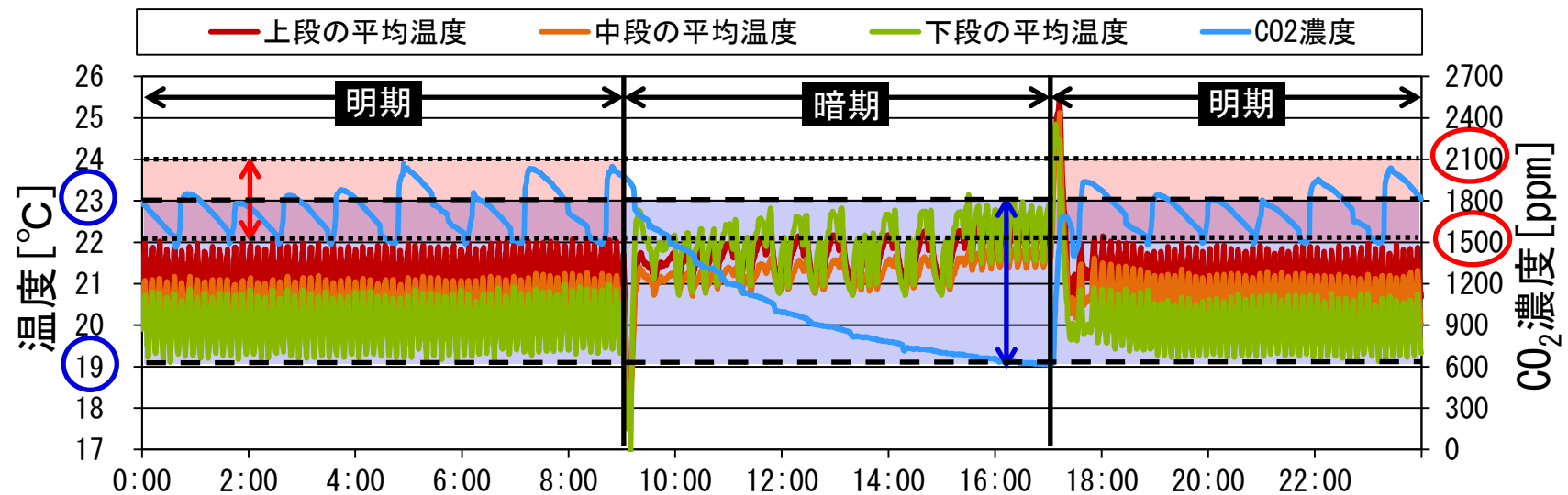


図 栽培設備②における平均温度及びコンテナ内のCO₂濃度変化※(1月24日)

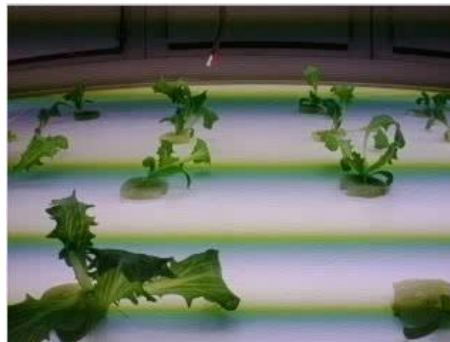
- ※ 4 明期:植物に光を照射する時間(照明点灯時)。栽培設備①では午前6時~午後10時(16時間)、栽培設備②では午後5時~午前9時(16時間)。
- ※ 各栽培設備の温度は各栽培パネル中心の照明からの距離100mm付近、CO₂濃度はエアコン吸込み口付近において測定する。



C (上段)



D (上段)



C (上段)



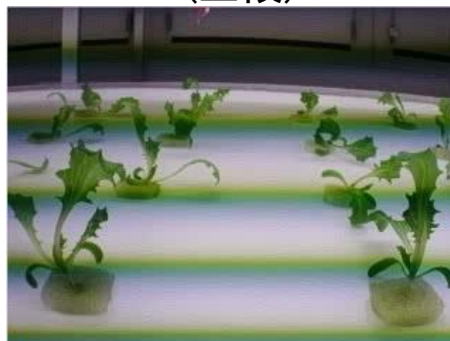
D (上段)



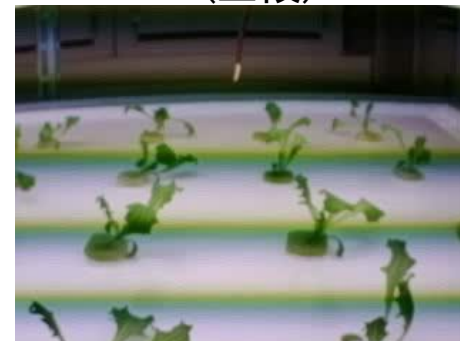
G (中段)



H (中段)



G (中段)



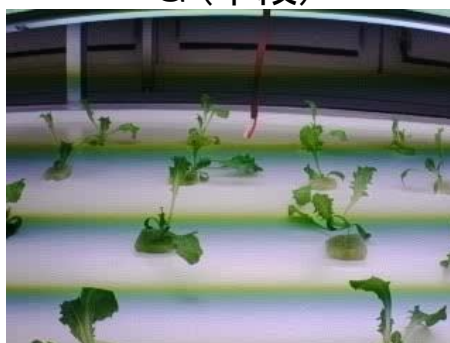
H (中段)



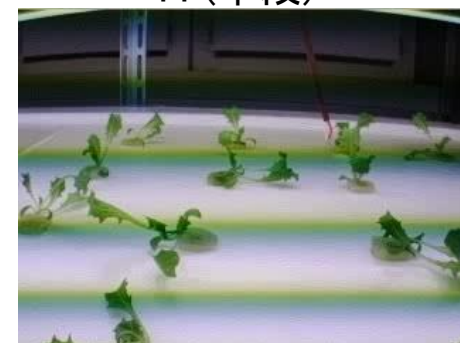
K (下段)



L (下段)



K (下段)



L (下段)

(i) 栽培設備①(12月18日～1月6日)

(ii) 栽培設備②(1月13日～2月10日)

動画 各栽培設備における栽培実験の様子

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30%少ない。

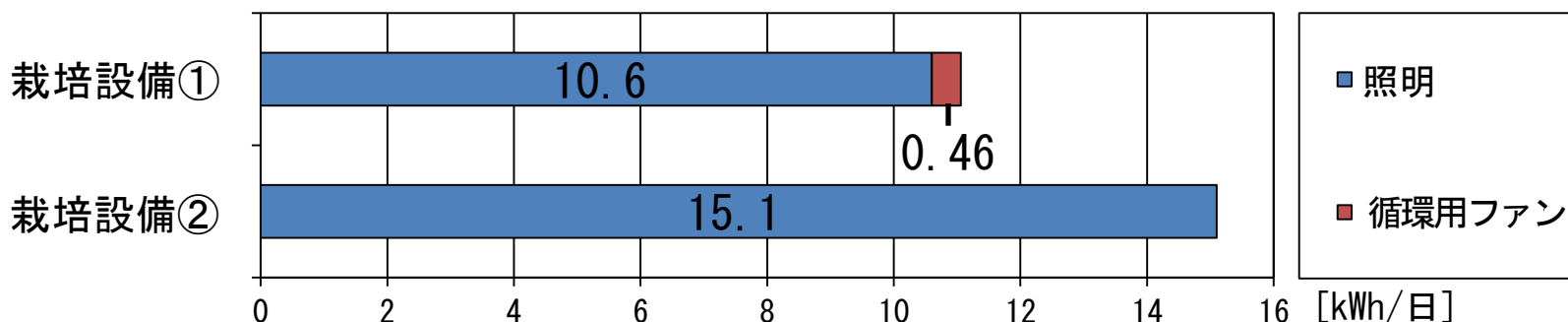
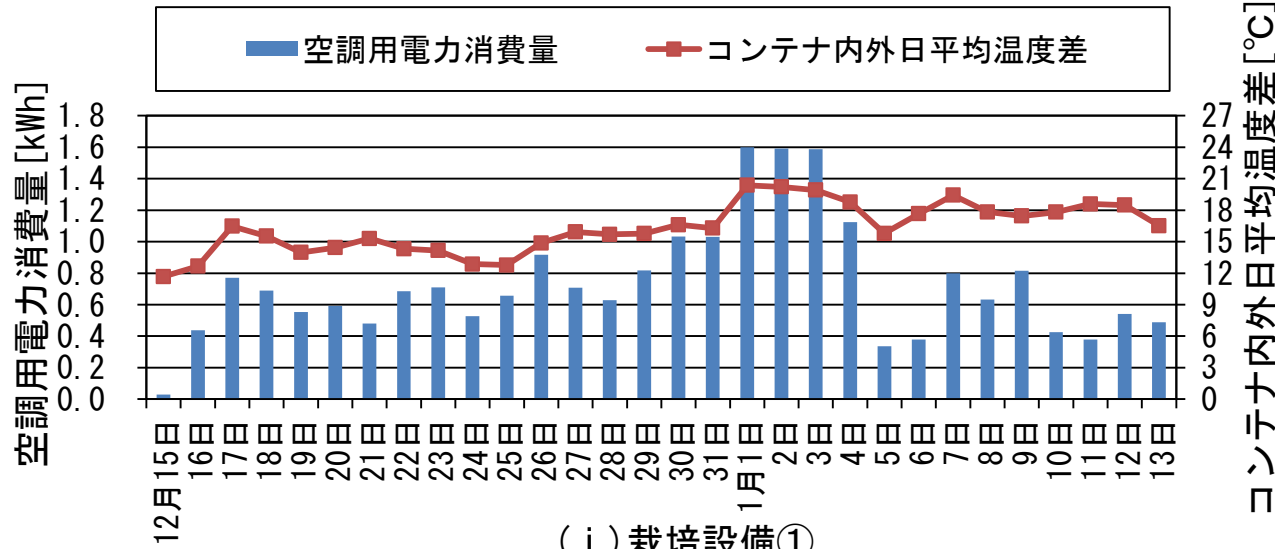


図8 各栽培設備の1日当たりの照明及び循環用ファンの電力消費量

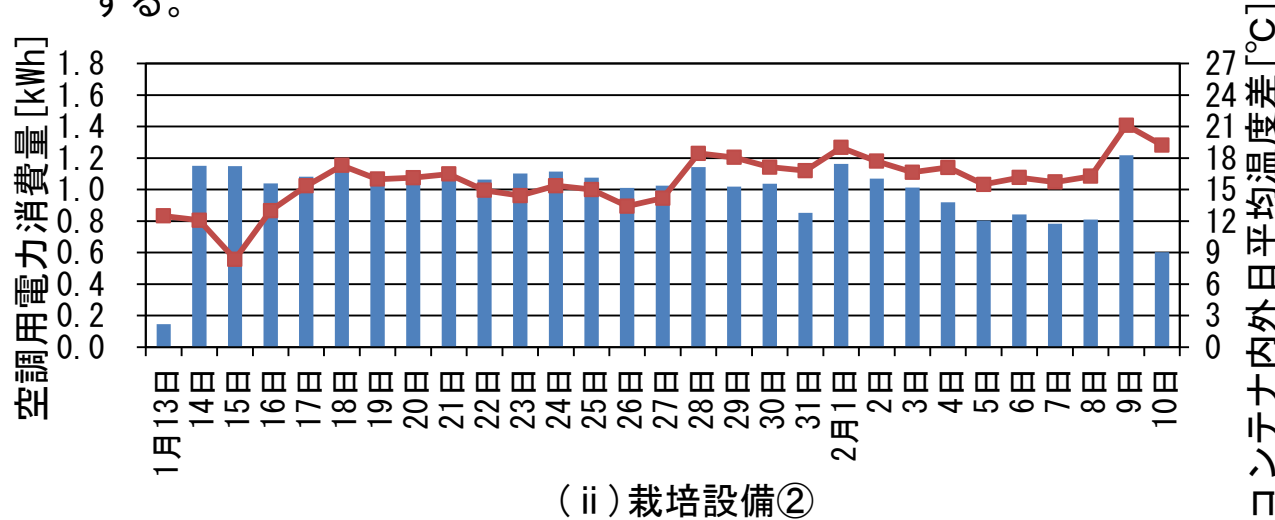
実験結果



(i) 栽培設備①

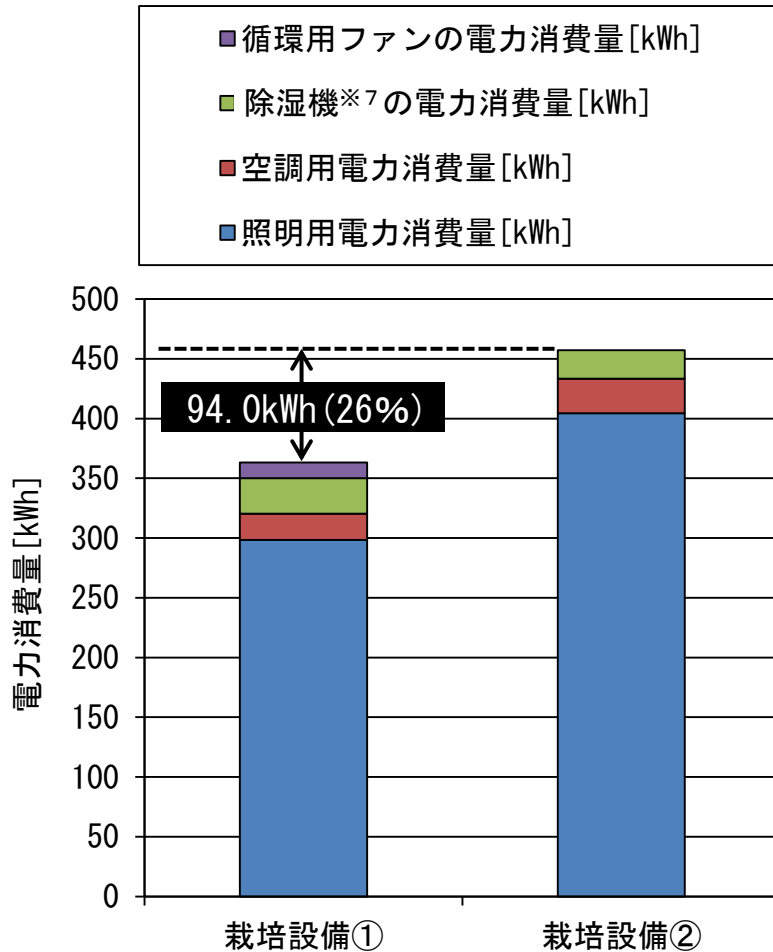
栽培設備① (0.7kWh/日) に比較して栽培設備② (1.0kWh/日) では、期間平均空調用電力消費量が30%多い。

※ 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。



(ii) 栽培設備②

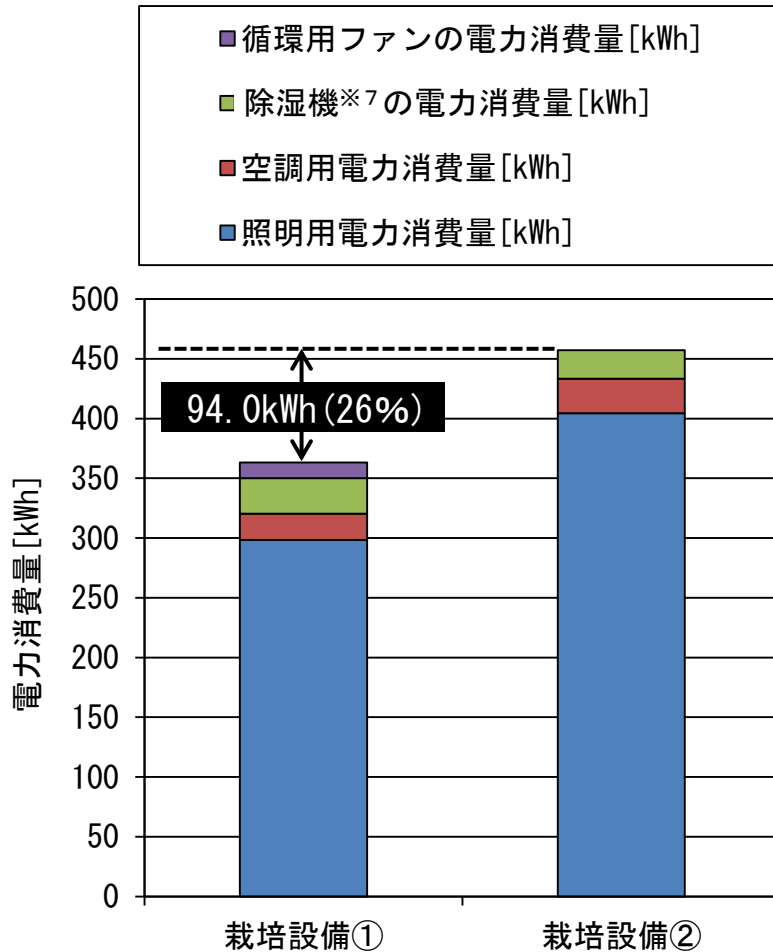
図 各栽培設備における日積算空調用電力消費量及びコンテナ内外日平均温度差



栽培設備①に比較して栽培設備②では、日積算電力消費量が94.0kWh (26%)多い。

図 各栽培設備における生育期間中の日積算電力消費量

※7 除湿機の稼働期間は栽培設備①の場合 1月4日午後4時25分～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合 2月4日午前11時30分～2月10日午後1時とする。



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、空調用電力消費量が相対的に少ない。



今後季節毎における実験を行う必要がある。

図 各栽培設備における生育期間中の日積算電力消費量

※7 除湿機の稼働期間は栽培設備①の場合 1月4日午後4時25分～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合 2月4日午前11時30分～2月10日午後1時とする。

表 各栽培設備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	栽培設備①	栽培設備②
生育日数[日]	28	27
収穫株数[株]	192	192
最大重量[g]※	137.7	107.6
最小重量[g]※	73.1	54.7
平均重量[g]※	109.8	80.1
総重量[g]※	18447	13456
変動係数[%]	14	21
照明用電力消費量[kWh]	298.5	404.5
空調用電力消費量[kWh]	22.0	28.8
除湿機※ ⁷ の電力消費量[kWh]	29.7	23.9
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	457.2
単位照明用電力消費量 当たりの収穫重量[g/kWh]	61.8	33.3
単位電力消費量当たりの 収穫重量[g/kWh]	50.8	29.4

栽培設備①と栽培設備②の
総重量はそれぞれ18,447g,
13,456g、電力消費量の合計
はそれぞれ363.2kWh, 457.2kWh、
単位電力消費量当たりの収
穫重量はそれぞれ50.8g/kWh,
29.4g/kWhである。

※ 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株ずつ除いて算出した。

※⁷ 除湿機の稼働期間は栽培設備①の場合1月4日午後4時25分～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合2月4日午前11時30分～2月10日午後1時とする。

※¹⁰ リーフレタス生育期間は栽培設備①の場合12月15日午後10時～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合1月13日午後9時～2月10日午後1時とする。

実験結果

表 各栽培設備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	栽培設備①	栽培設備②
生育日数[日]	28	27
収穫株数[株]	192	192
最大重量[g]※	137.7	107.6
最小重量[g]※	73.1	54.7
平均重量[g]※	109.8	80.1
総重量[g]※	18447	13456
変動係数[%]	14	21
照明用電力消費量[kWh]	298.5	404.5
空調用電力消費量[kWh]	22.0	28.8
除湿機※ ⁷ の電力消費量[kWh]	29.7	23.9
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	457.2
単位照明用電力消費量 当たりの収穫重量[g/kWh]	61.8	33.3
単位電力消費量当たりの 収穫重量[g/kWh]	50.8	29.4

※ 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株ずつ除いて算出した。

※⁷ 除湿機の稼働期間は栽培設備①の場合1月4日午後4時25分～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合2月4日午前11時30分～2月10日午後1時とする。

※¹⁰ リーフレタス生育期間は栽培設備①の場合12月15日午後10時～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合1月13日午後9時～2月10日午後1時とする。



図 チップバーン※の様子

栽培設備②ではチップバーン※が多く見られた。

※ 植物周囲が高濃度状態に(湿度・O₂・CO₂濃度等)となると植物に生育障害が発生し、特に株の中心部が黒く枯れる。

表 各栽培設備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	栽培設備①	栽培設備②
生育日数[日]	28	27
収穫株数[株]	192	192
最大重量[g]※	137.7	107.6
最小重量[g]※	73.1	54.7
平均重量[g]※	109.8	80.1
総重量[g]※	18447	13456
変動係数[%]	14	21
照明用電力消費量[kWh]	298.5	404.5
空調用電力消費量[kWh]	22.0	28.8
除湿機※ ⁷ の電力消費量[kWh]	29.7	23.9
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	457.2
単位照明用電力消費量 当たりの収穫重量[g/kWh]	61.8	33.3
単位電力消費量当たりの 収穫重量[g/kWh]	50.8	29.4

※ 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株ずつ除いて算出した。

※⁷ 除湿機の稼働期間は栽培設備①の場合 1月4日午後4時25分～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合 2月4日午前11時30分～2月10日午後1時とする。

※¹⁰ リーフレタス生育期間は栽培設備①の場合12月15日午後10時～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合 1月13日午後9時～2月10日午後1時とする。

したがって、赤青LEDと超高効率反射材※³を用いた栽培設備①を用いることにより、栽培設備②と比較して生育障害が少なく、約1/4少ない電力消費量で同等以上の収穫重量を得ることが可能である。

※³ 栽培設備内壁面にはH社製超高効率反射材(全反射率99%)を設置し、栽培パネル面にはD社製超高効率反射材(全反射率99%)を設置する。

- 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赤青LEDと超高効率反射材※³を用いることで、栽培設備②に比較して栽培設備①では、1日当たりの照明用電力消費量が約30%少ない。
- ③栽培設備①に比較して栽培設備②では、生育期間※¹⁰中の日積算電力消費量が94.0kWh(26%)多い。
- ④栽培設備①と栽培設備②の総重量はそれぞれ18,447g, 13,456g、電力消費量の合計はそれぞれ363.2kWh, 457.2kWh、単位電力消費量当たりの収穫重量はそれぞれ50.8g/kWh, 29.4g/kWhである。
- ⑤赤青LEDと超高効率反射材※³を用いた栽培設備①を用いることにより、栽培設備②と比較して生育障害が少なく、約1/4少ない電力消費量で同等以上の収穫重量を得ることが可能である。

※3 栽培設備内壁面にはH社製超高効率反射材(全反射率99%)を設置し、栽培パネル面にはD社製超高効率反射材(全反射率99%)を設置する。

※10 リーフレタス生育期間は栽培設備①の場合12月15日午後10時～1月13日午前10時15分、栽培設備②の場合1月13日午後9時～2月10日午後1時とする。