

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

指導教員

若月裕紀
赤林伸一教授





図 S社の完全人工光型植物工場

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。

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。

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。

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。

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)の解析を行う。



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。

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する。

※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%)

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、生育日数等を比較する。



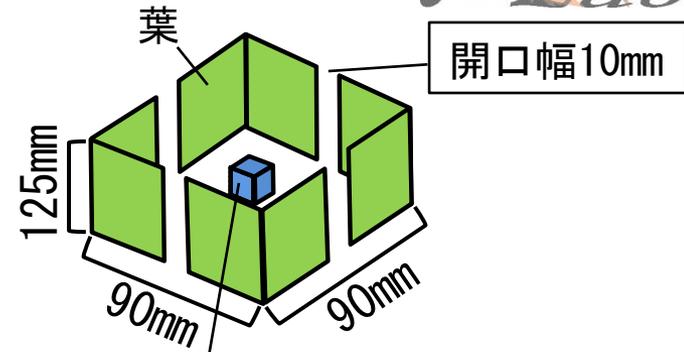
省エネ型植物栽培設備の性能を評価する。

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。

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。

- ※² 給気口 (50mm × 50mm)
- ※³ 排気口 (345mm × 50mm)



拡散物質 (主に水蒸気) 発生位置
10mm × 10mm × 10mm

図1 植物モデルの概要

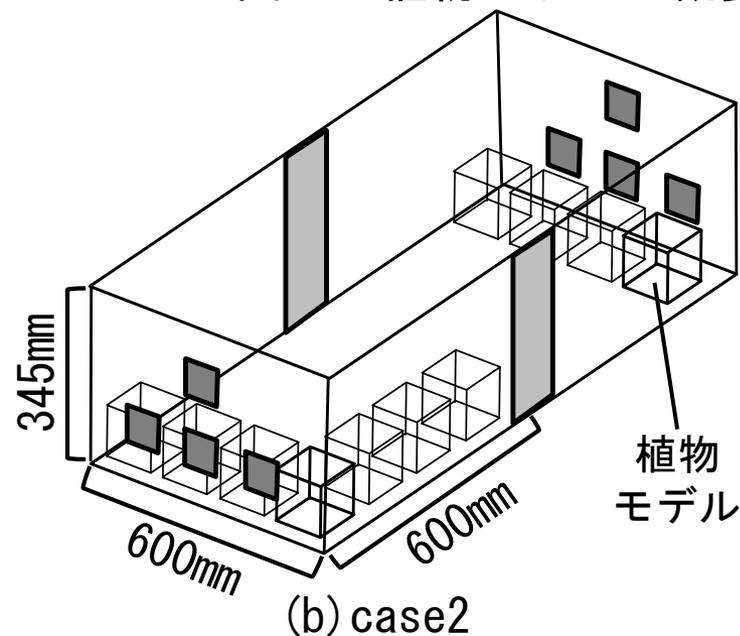
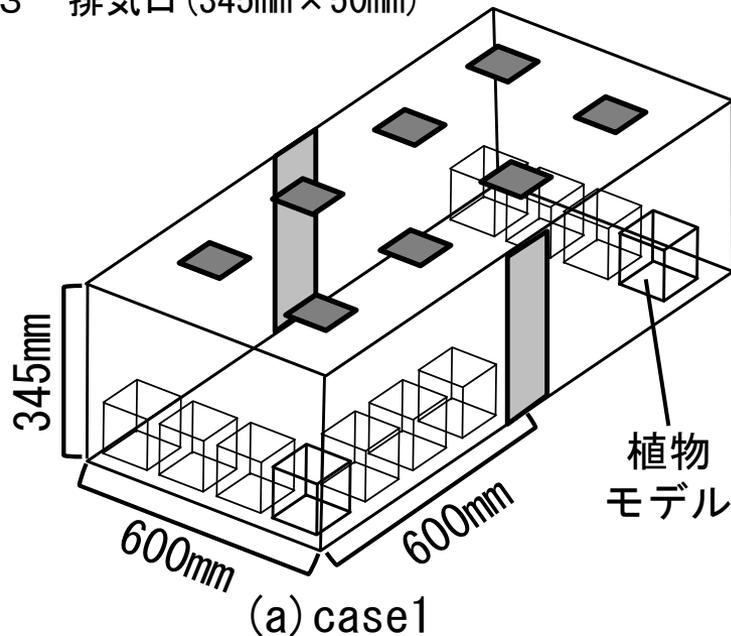
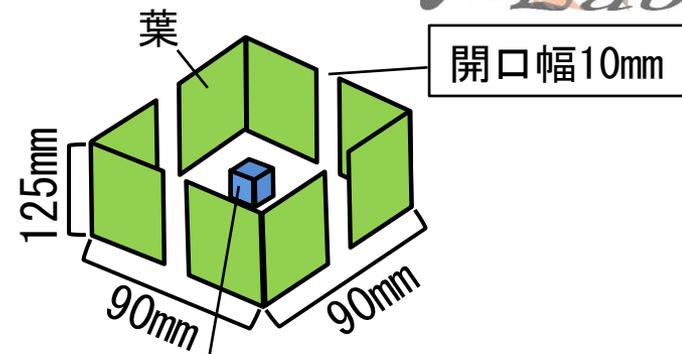


図2 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

解析概要

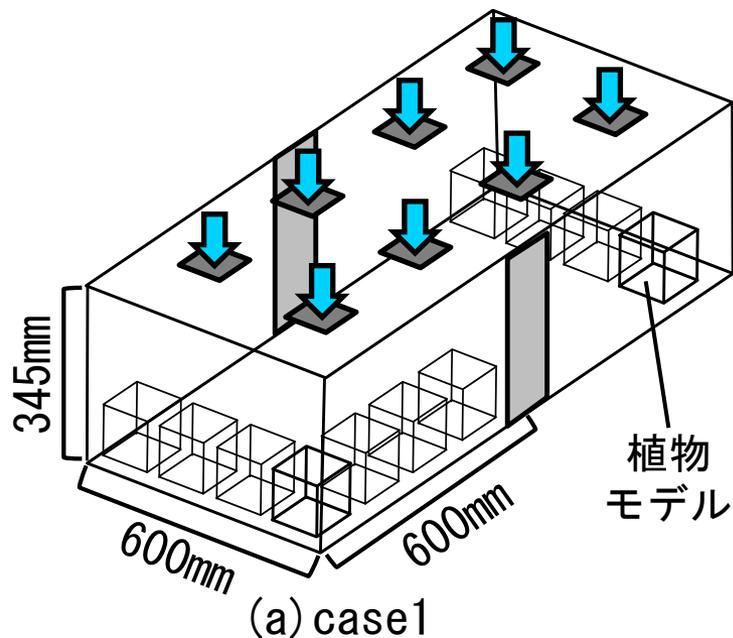
解析は汎用数値流体解析ソフト
STREAM Ver. 10を用いる。

case1では給気口を上面に設け、
下向きに給気する。

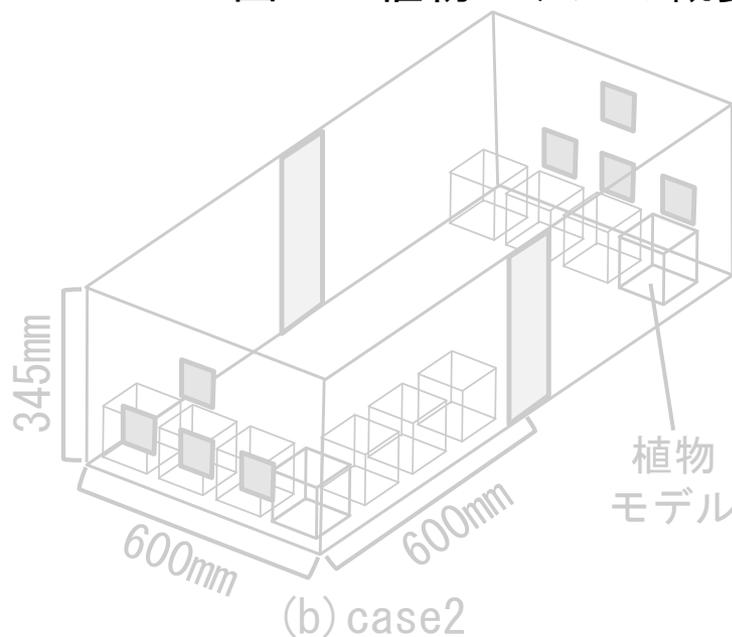


拡散物質 (主に水蒸気) 発生位置
10mm × 10mm × 10mm

図1 植物モデルの概要



(a) case1



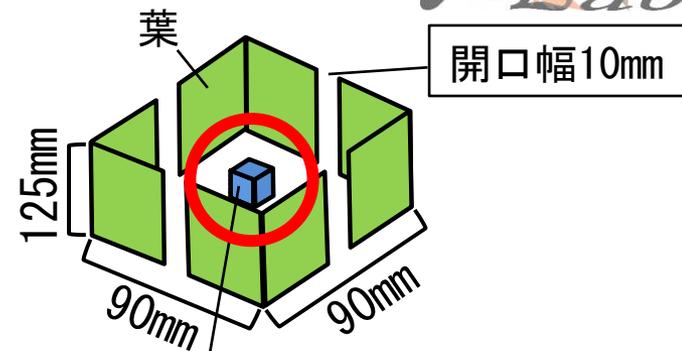
(b) case2

図2 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

解析概要

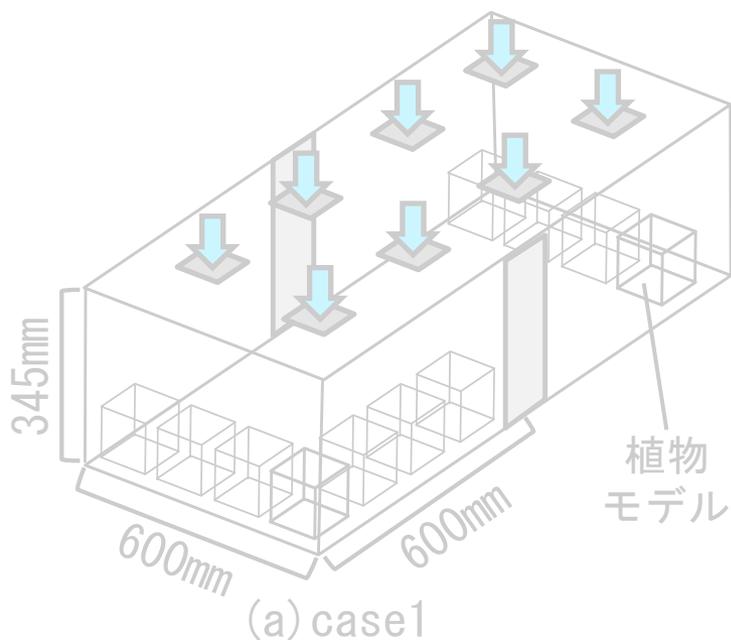
解析は汎用数値流体解析ソフト
STREAM Ver. 10を用いる。

case2では給気口を側面に設け、
横向きに給気する。

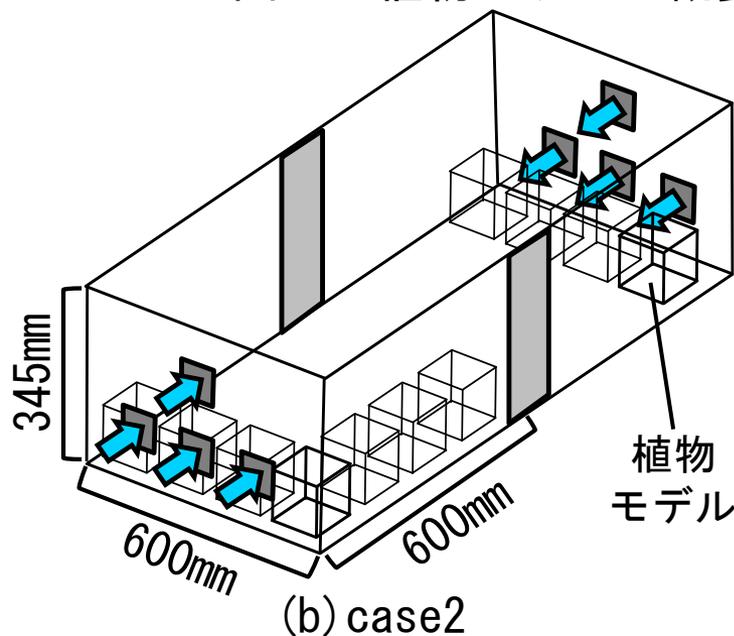


拡散物質 (主に水蒸気) 発生位置
10mm × 10mm × 10mm

図1 植物モデルの概要



(a) case1



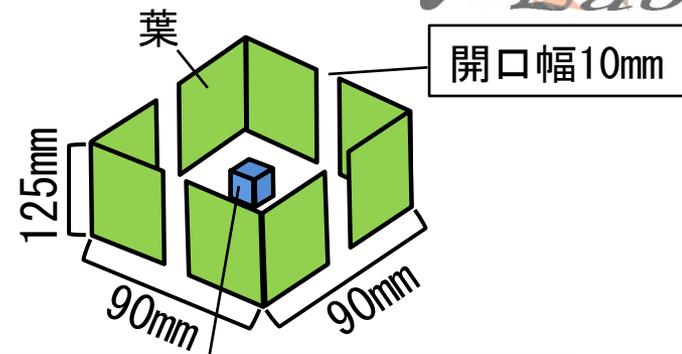
(b) case2

図2 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

解析概要

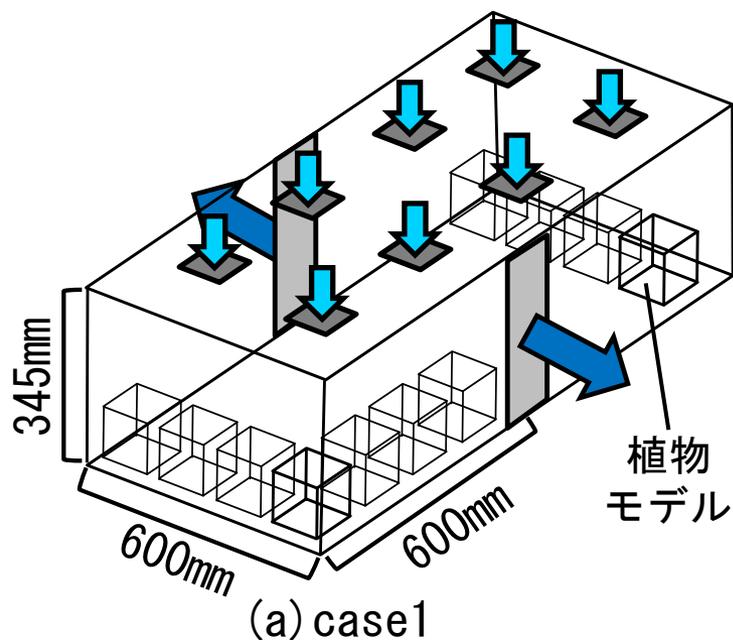
解析は汎用数値流体解析ソフト
STREAM Ver. 10を用いる。

排気口は両caseともダクトの長
辺側の両側面中央部に設ける。

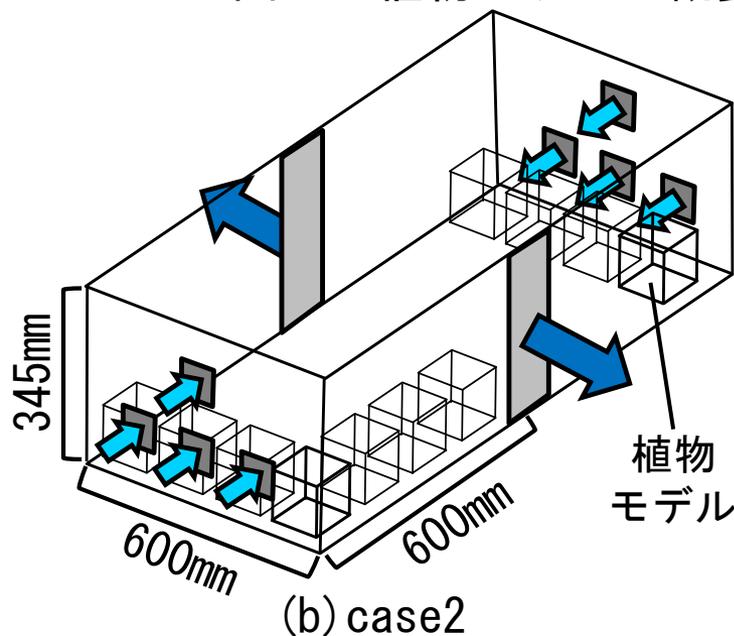


拡散物質 (主に水蒸気) 発生位置
10mm × 10mm × 10mm

図1 植物モデルの概要



(a) case1



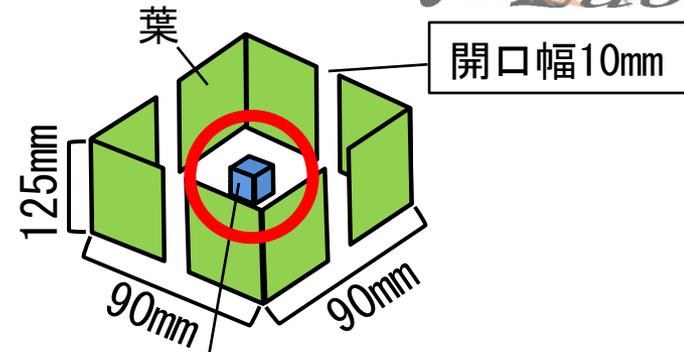
(b) case2

図2 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

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。

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。



拡散物質（主に水蒸気）発生位置
10mm × 10mm × 10mm

図1 植物モデルの概要

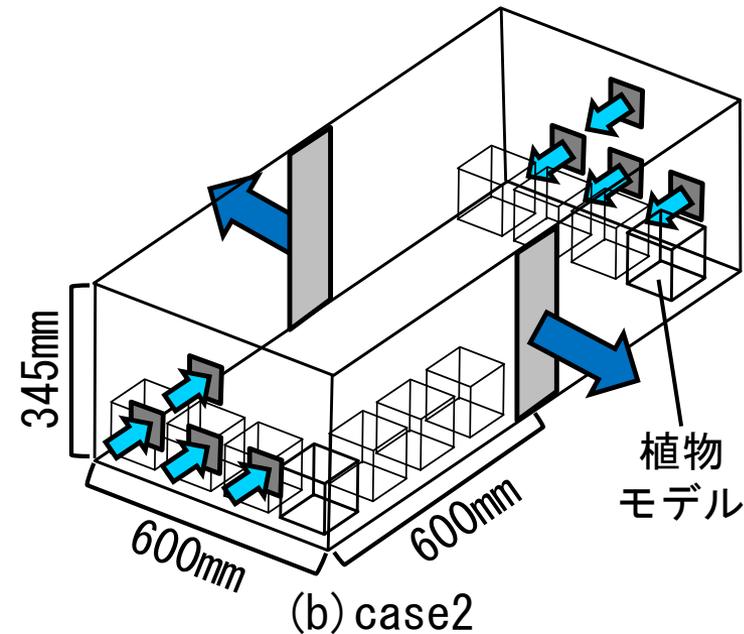
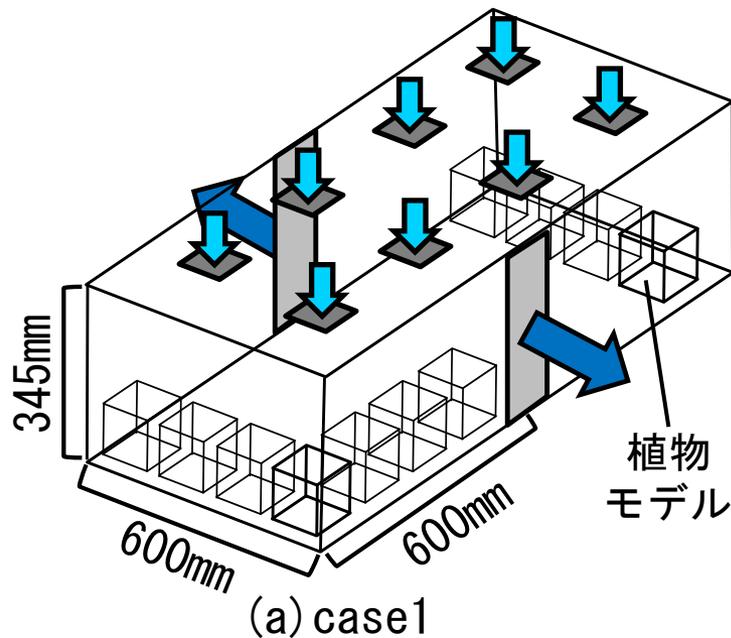
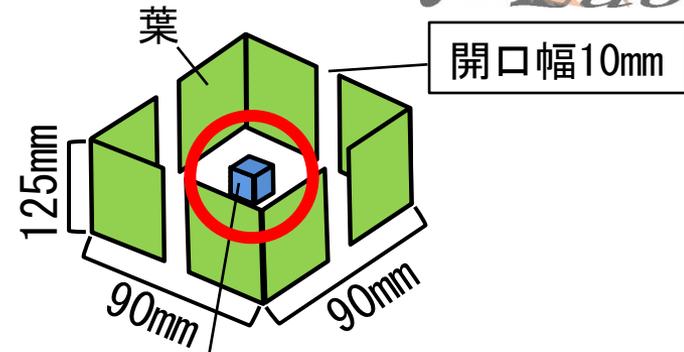


図2 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

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。

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。



拡散物質（主に水蒸気）発生位置
10mm × 10mm × 10mm

図1 植物モデルの概要

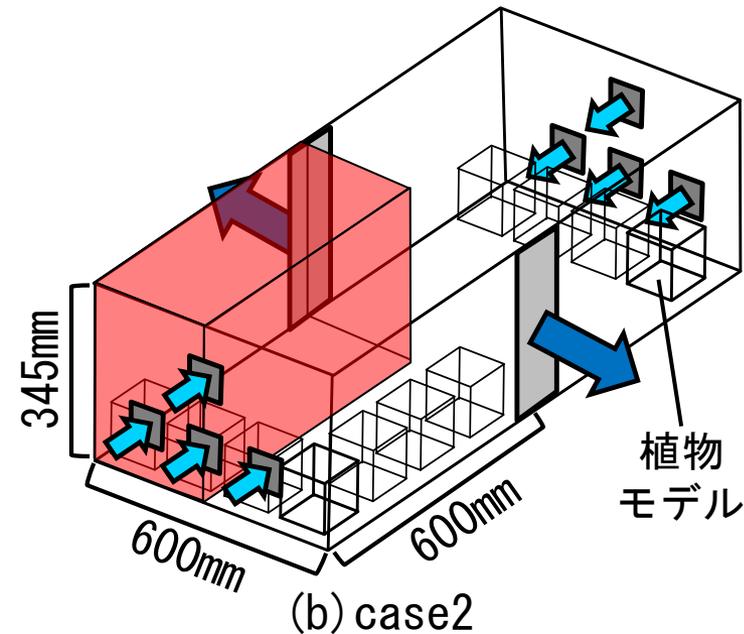
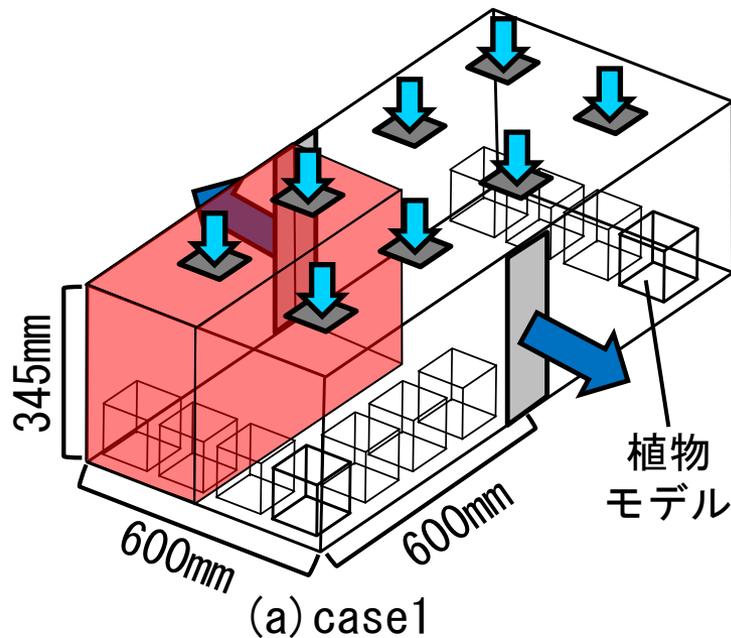


図2 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

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。



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

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

実験概要

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。

※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。

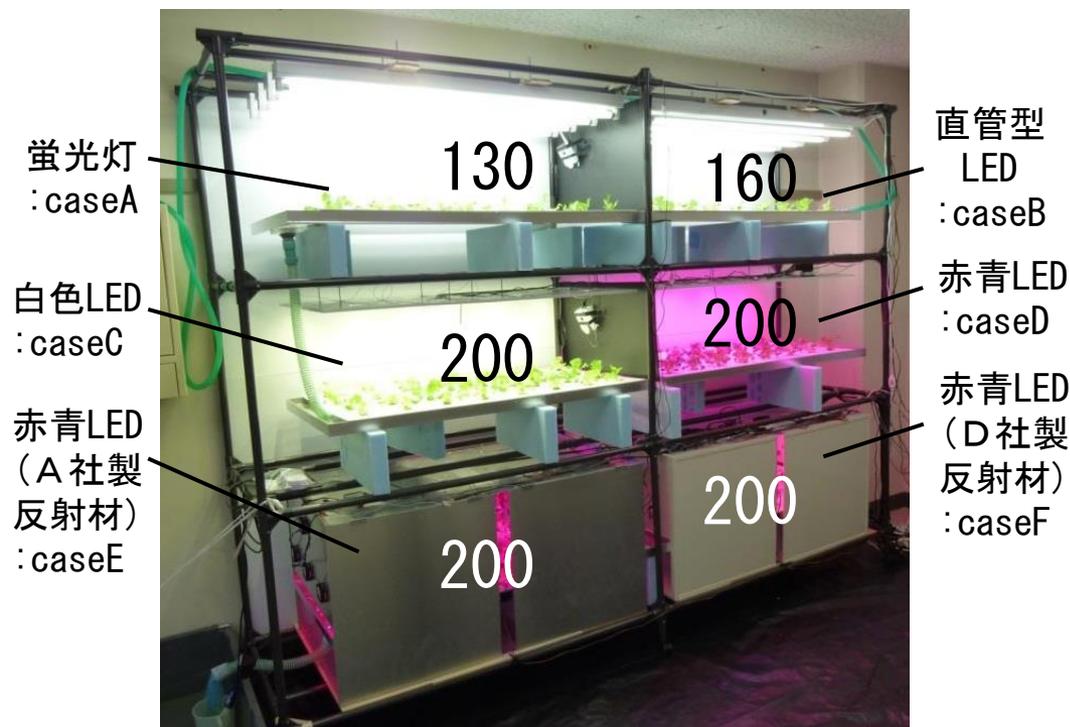
※⁷ UV殺菌灯の稼働時間は午後8時~午後10時30分(2時間30分)とする。



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



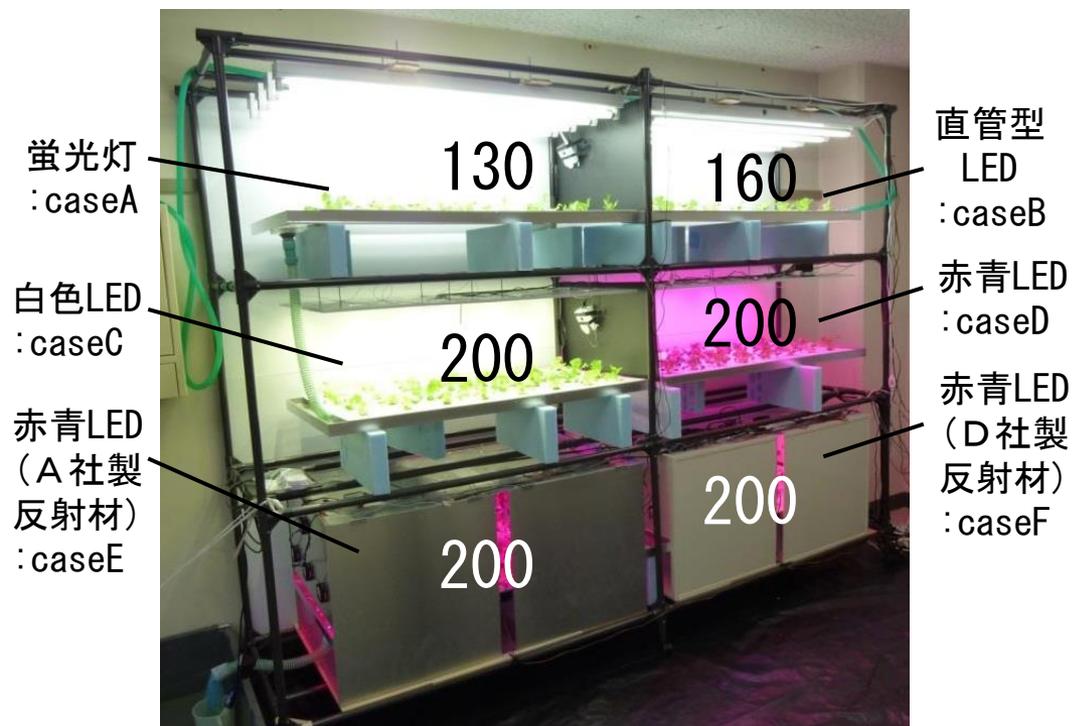
単位 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

図 各栽培条件の光量子束密度の値

各栽培条件の光強度は、**光合成有効光量子束密度**を指標とする。

- ・ caseA, Bは成り行き ($130, 160 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 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※

※ CO_2 濃度が 1000ppm のとき、光量子束密度が約 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ で飽和光合成速度となるため。



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。電力消費量の実測には電力量測定センサを用いる。

単位 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

図 各栽培条件の光量子束密度の値

温熱空気環境^{※9}の制御にはパッケージエアコン、CO₂ボンベ、循環式紫外線空気清浄機、送風機を用いる。

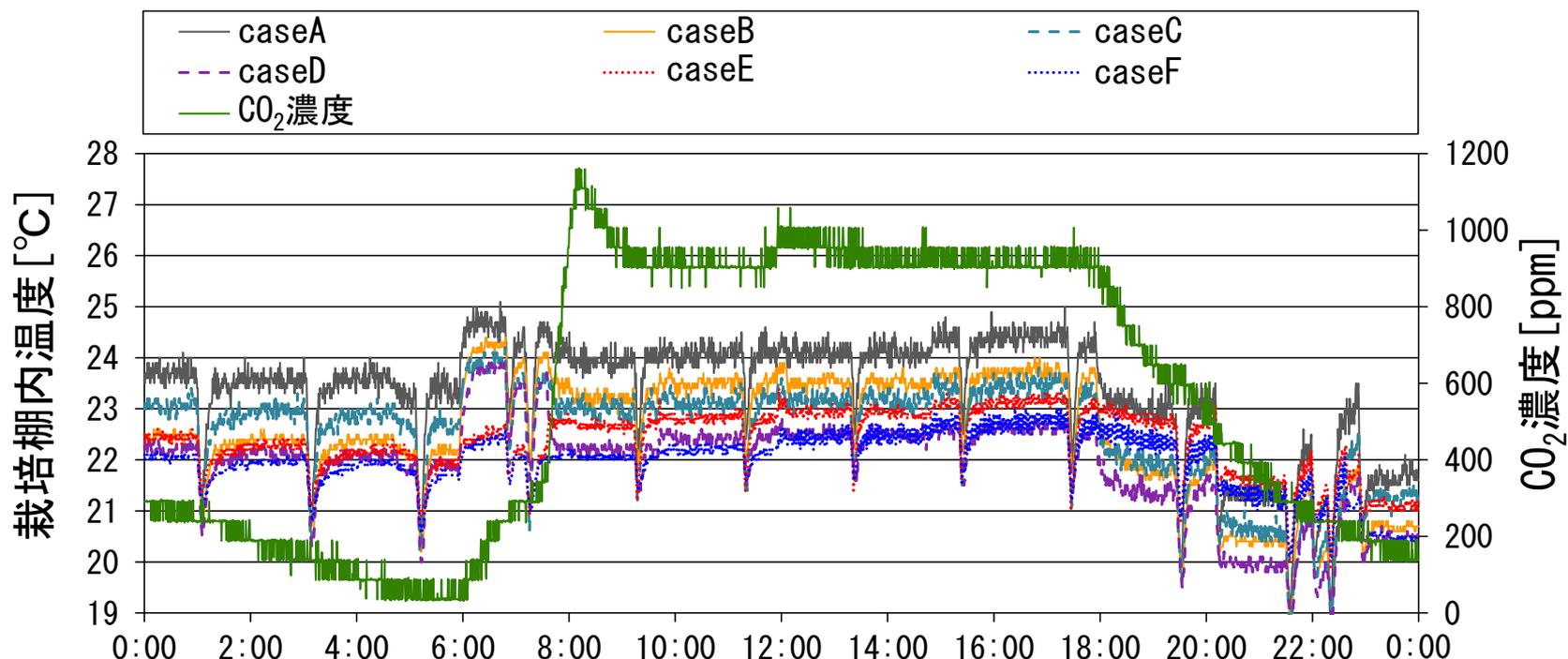


図5 各栽培棚内の温度及び栽培室内のCO₂濃度変化(12月15日)^{※4}

※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。

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。

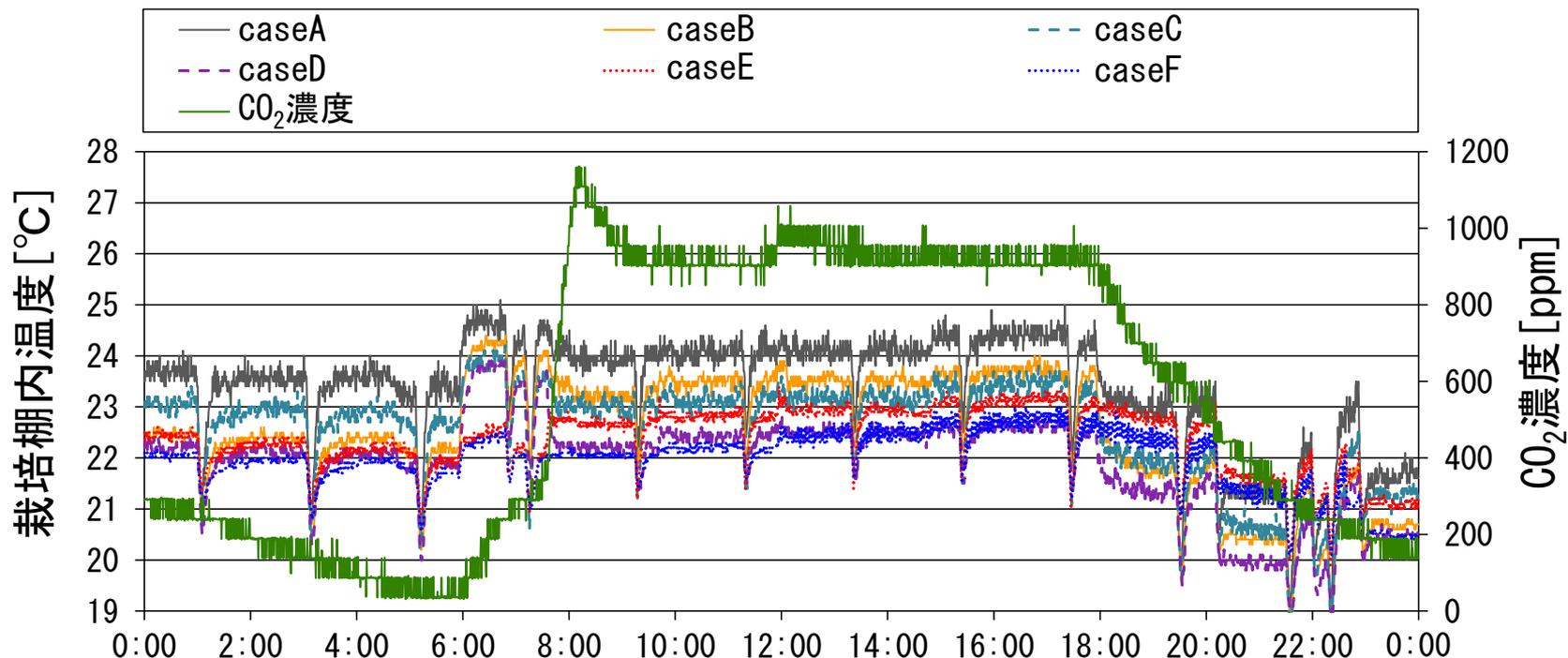


図5 各栽培棚内の温度及び栽培室内のCO₂濃度変化(12月15日)※4

※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。

各栽培棚の温度は概ね22~25°Cに制御されている。
 明期ではCO₂濃度は約800~1200ppmに保たれている。

※9 明期における温度とCO₂濃度の目標値はそれぞれ、22~25°C、1000ppm程度とする。

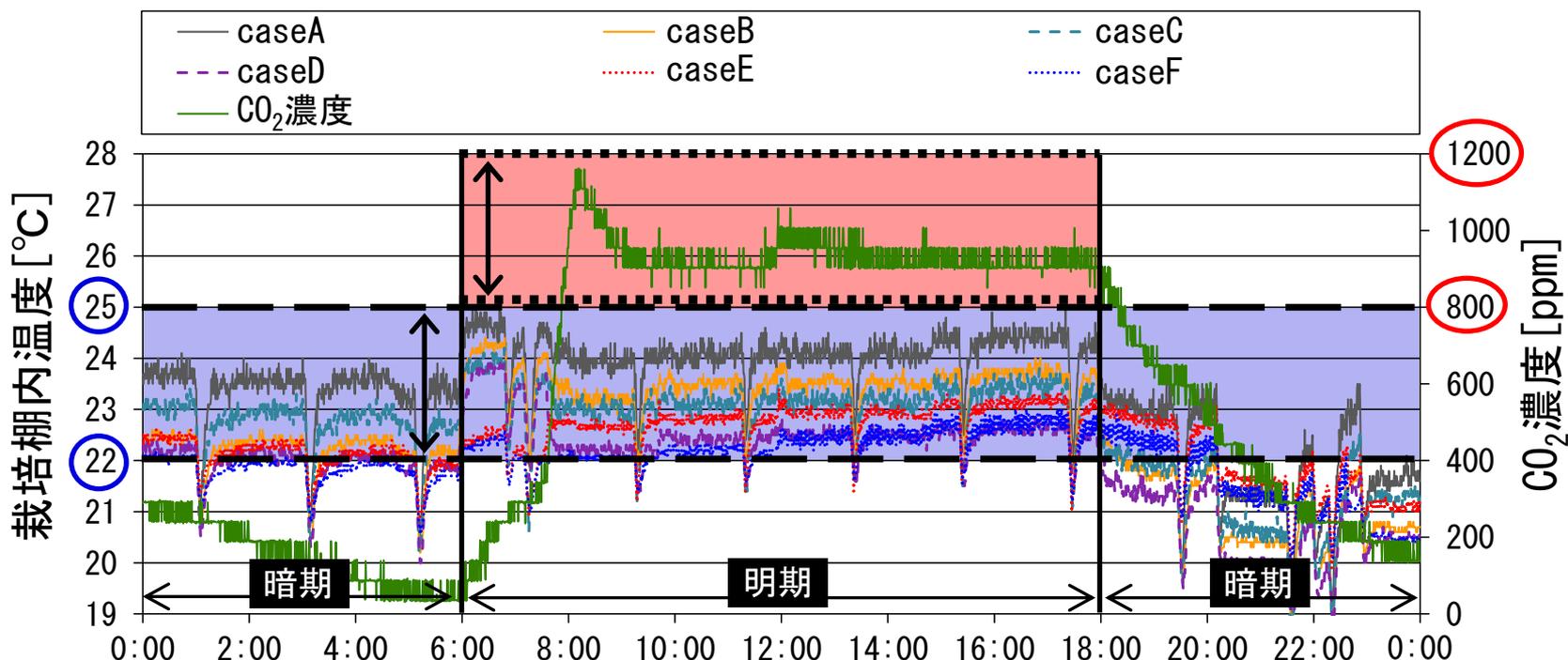


図5 各栽培棚内の温度及び栽培室内のCO₂濃度変化(12月15日)※4

※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。

解析結果 (CFD解析結果)

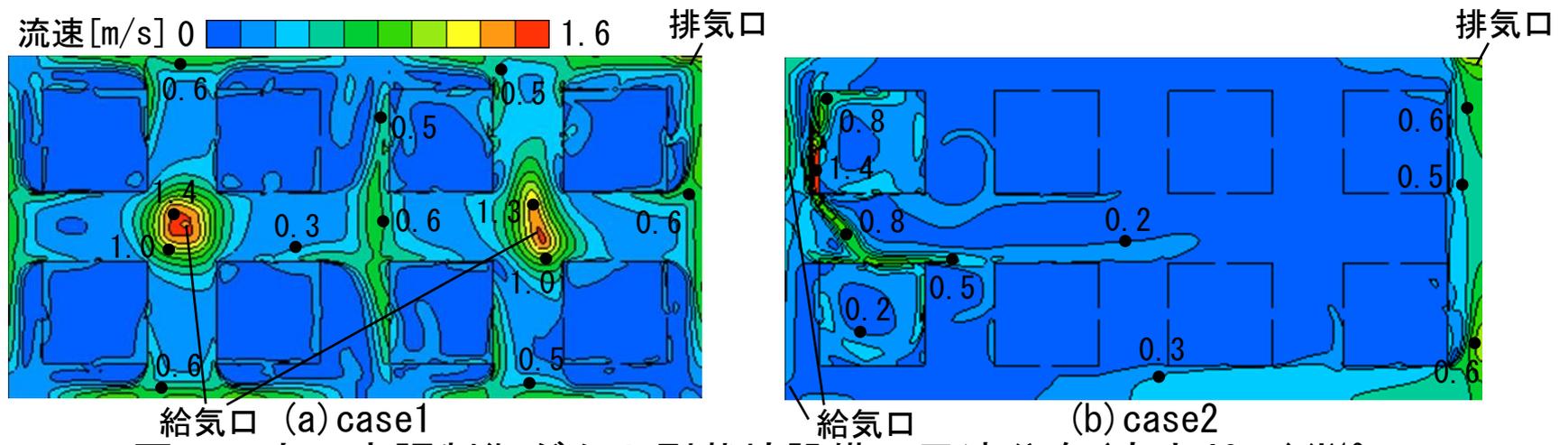


図6 光・空調制御ダクト型栽培設備の風速分布 (高さ40mm) ※10

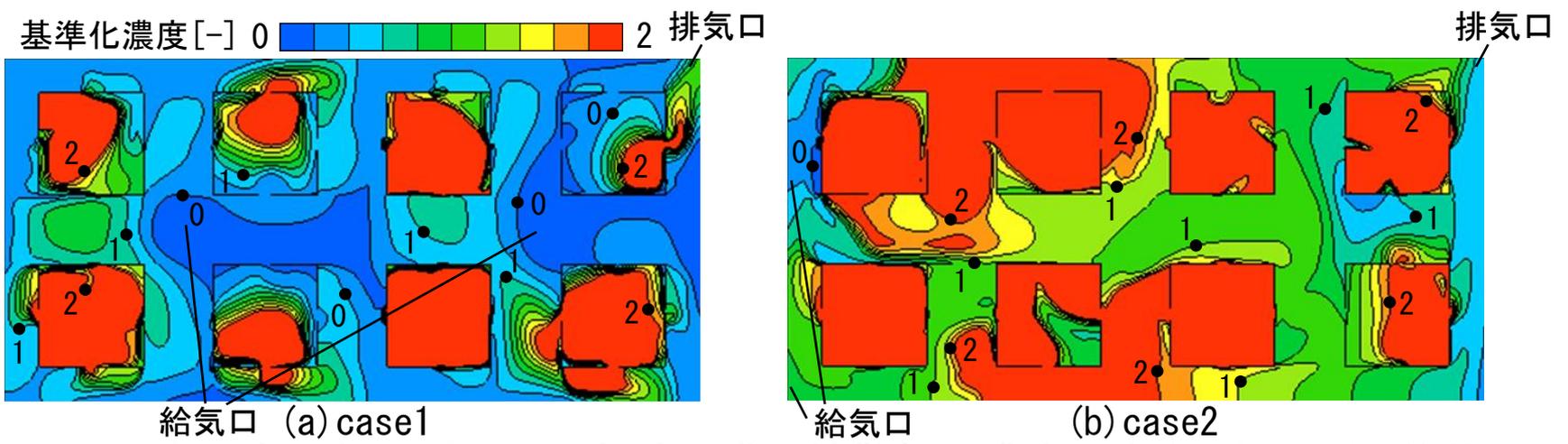


図7 光・空調制御ダクト型栽培設備の拡散物質濃度分布 (高さ40mm) ※10, 11

※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の区画で分布を表す。
 ※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。

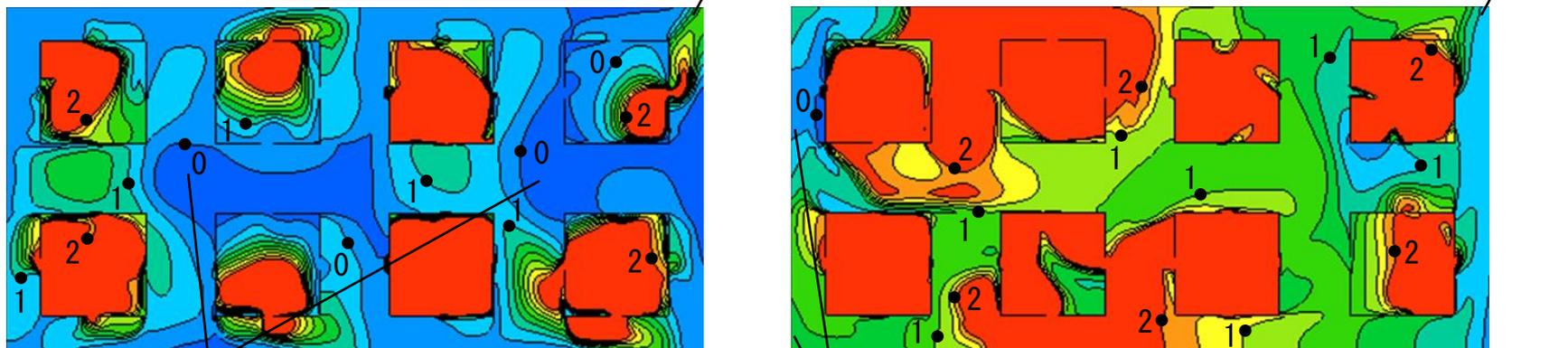
解析結果 (CFD解析結果)

流速 [m/s] 0 1.6 排気口

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。

給気口 (a) case1 給気口 (b) case2
図6 光・空調制御ダクト型栽培設備の風速分布 (高さ40mm) ※10

基準化濃度 [-] 0 2 排気口



給気口 (a) case1 給気口 (b) case2

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

※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の区画で分布を表す。

※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。

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。

※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。

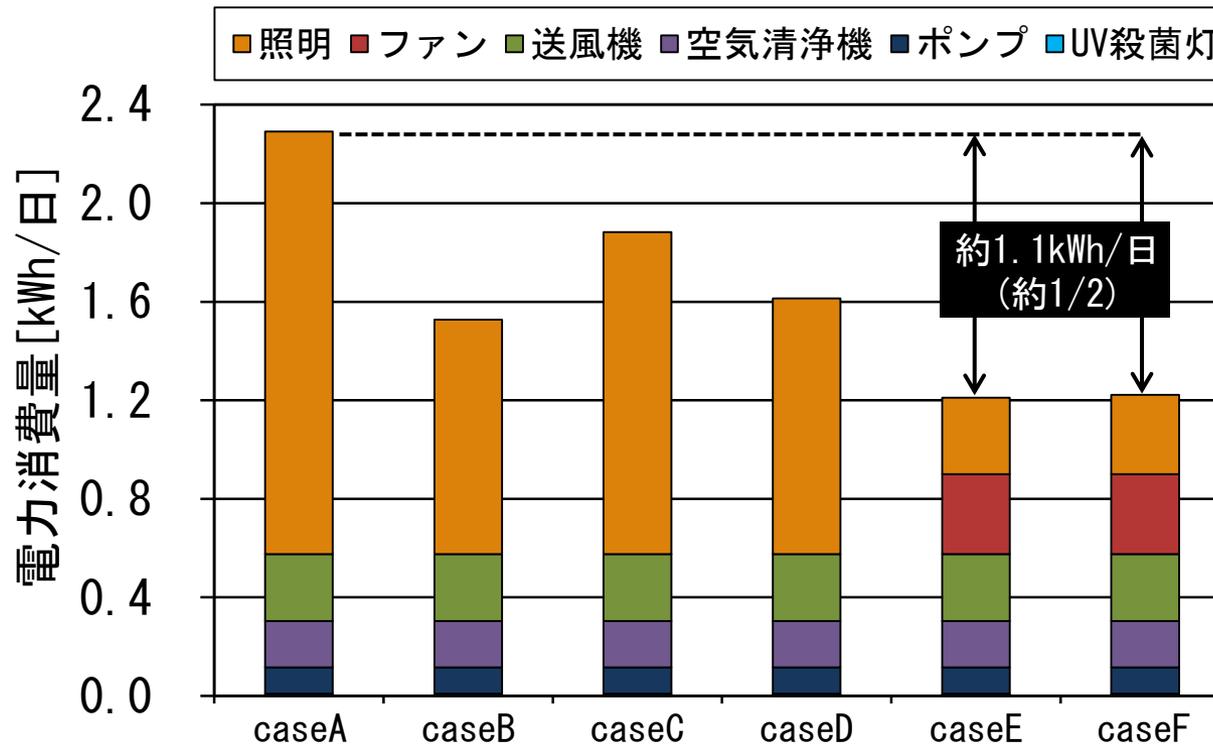


図8 各栽培条件の1日当たりの電力消費量

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。

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れる。

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]*	1,719	2,064	2,649	2,005	1,444	1,451
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小さい方からそれぞれ4株ずつを除いて算出した。

実験結果 (栽培実験結果)

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。

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れる。

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]*	1,719	2,064	2,649	約11~18g/kWh (32~43%)少ない		1,451
標準偏差[g]	22.7	28.7	34.7			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小さい方からそれぞれ4株ずつを除いて算出した。

実験結果 (栽培実験結果)

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。



caseA



caseC



caseE



caseB



caseD



caseF

図 現在の栽培実験の様子 (2月16日)

- 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と超高効率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。
- ③ 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、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。



caseA



caseC



caseE



caseB



caseD



caseF

図 現在の栽培実験の様子(2月16日)

表 現在の各caseの植物の高さと照明用電力消費量(2月16日)

	caseA	caseB	caseC	caseD	caseE	caseF
植物の高さ[cm]	14	15	17	14	16	17
照明用電力消費量[W]	145	80	110	90	45	45
給気口のファン の電力消費量[W]	-	-	-	-	14	14
合計[W]	145	80	110	90	59	59

栽培室の平面図

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。

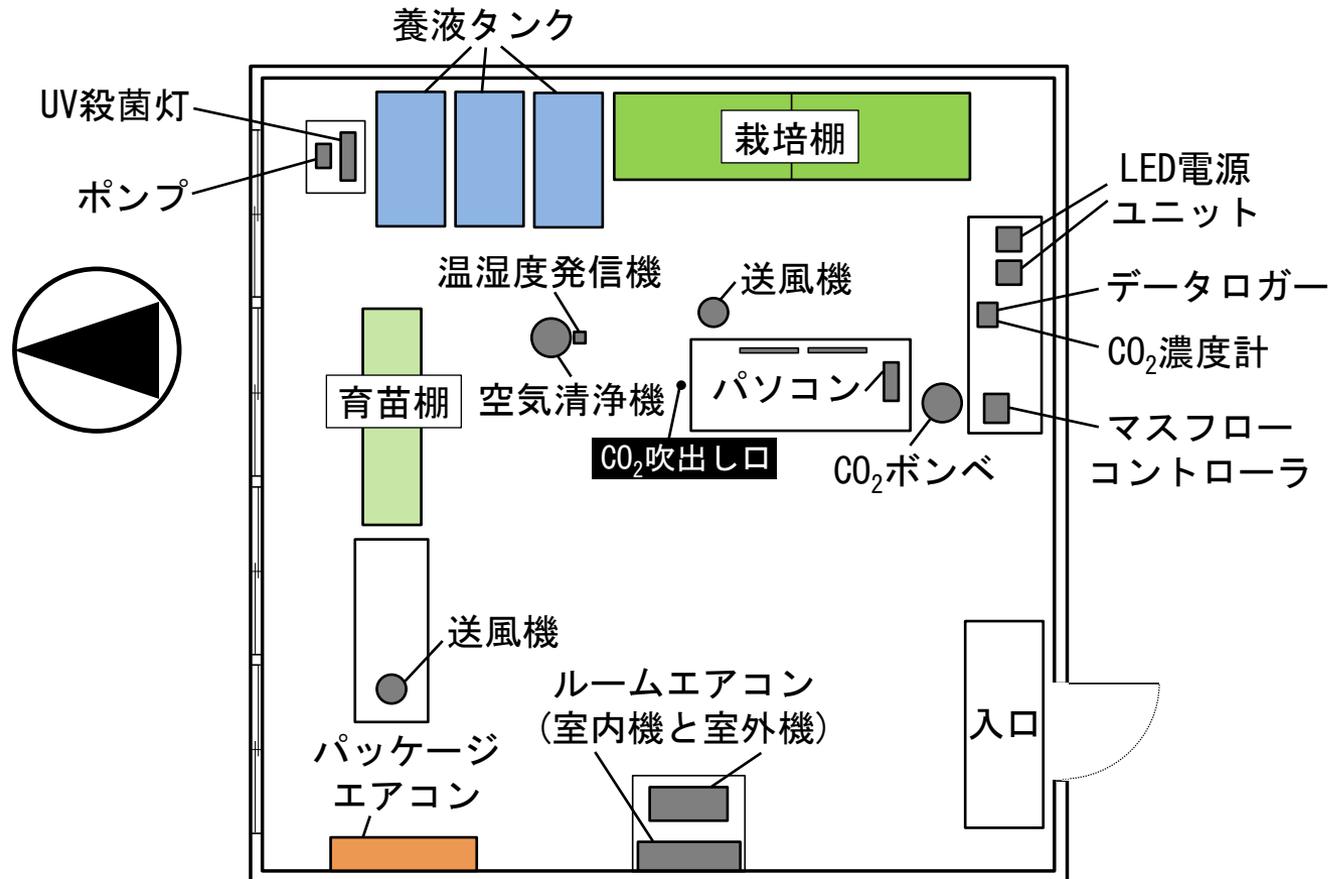


図 栽培室の平面図

pHが上昇した場合→アミノハウスS1号を材料とした1号原液を用いて、調整を行う。

pHが低下した場合→アミノハウス1号を材料とした1号原液を用いて、調整を行う。

ECが低下した場合→新しい培養液を作成・追加し、調整を行う。

植物工場は、施設内で植物の生育環境（光、温度、湿度、二酸化炭素濃度、養分、水分等）を制御して栽培を行う施設園芸のうち、環境及び生育のモニタリングを基礎として、**高度な環境制御と生育予測を行う**ことにより、野菜等の植物の周年・計画生産が可能な栽培施設である。植物工場には、

- (1)閉鎖環境で太陽光を使わずに環境を制御して周年・計画生産を行う「**完全人工光型**」
- (2)温室等の半閉鎖環境で太陽光の利用を基本として、雨天・曇天時の補光や夏季の高温抑制技術等により周年・計画生産を行う「**太陽光利用型**」（太陽光利用型のうち、特に人工光を利用するものについては「**太陽光・人工光併用型**」という）

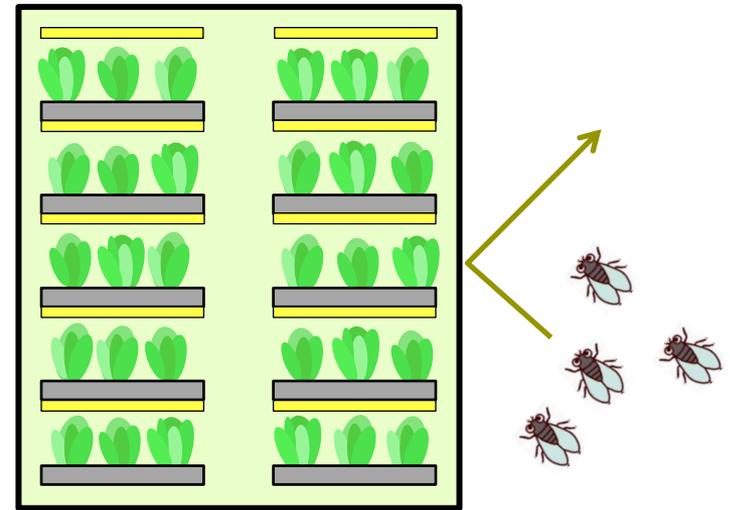
の2つがある。

農林水産省、経済産業省HPより

http://www.meti.go.jp/policy/local_economy/syokubutsukoujyou/syokubutsukoujireisyu.pdf#search='%E6%A4%8D%E7%89%A9%E5%B7%A5%E5%A0%B4'

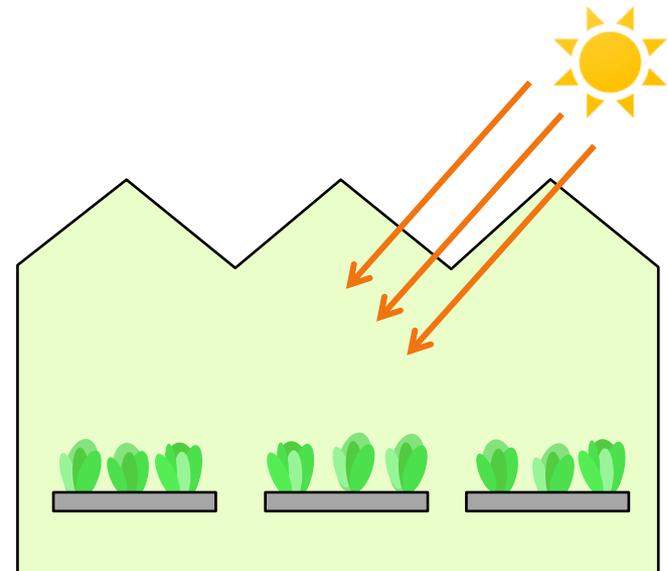
完全人工光型植物工場の特徴

人工光のみで栽培する
細菌や害虫の心配がない
棚を重ねることができる
比較的弱い光で育つ葉菜向き



太陽光利用型植物工場の特徴

太陽光を利用して栽培する
初期投資が比較的小さい
栽培光に費用がかからない
強い光を必要とする果菜向き



利点

■ 無菌
無農薬



日持ちが良い
廃棄部分がほとんどない
洗浄が必要ない

水溶性の栄養を流してしまわない
洗浄にかかる水道費、薬剤の削減
手間、人件費がかからない

- 品質(量・形・味・価格・栄養素)・価格が年中安定
- 農業知識が乏しくても栽培が可能
- 作業負荷が小さいため、高齢者や障害者の雇用につながる
- 連作障害が起こらない
- どこ(南極・砂漠・ビル・地下・塩害のある土地)でも植物が育つ
- 収穫のサイクルが短いこと、調節できること
- 小さい面積で大きな収穫量

欠点

■ 初期投資が大きいこと

小規模のものでも数千万、多くは1億弱
→倉庫や工場の空き建物を使うなら
大幅コストダウン

■ ランニングコスト(照明・冷房)が大きい

露地栽培の1.7~2.0倍程度
最もコストダウンに成功した例でも1.3倍程

- 栽培品目が少ない
- 販売価格がまだまだ高い
- 工業なのか農業なのかが曖昧



図 植物工場※数の推移

※販売を目的とした施設

- 太陽光利用型の植物工場は緩やかに増えているのに対し、人工光型植物工場は近年急激に数を増している
- 栽培品目はリーフレタス、ホウレン草、水菜、ハーブ系など葉物野菜が中心

- 1985 日本初の人工光型植物工場
- 2008 ジャガイモの水耕栽培に成功
(収量は土耕の約4倍、改良により10倍を見込んでいる)

植物工場の野菜は外食チェーン店やコンビニ、病院などでは多く使われている

→ 加工がしやすく、供給が安定しているため

果菜類は光量を多く必要とするため、完全人工光型植物工場には向いていない

ビタミン・ミネラルを多く含む

- ・サプリメントとしての役割をもたせる
- ・疾患の予防、可能性を下げる

花粉症抑制効果のある米

アルツハイマー病ワクチンとして的大豆

コレラ菌及び、インフルエンザワクチンとしての米

- ・摂取方法が注射ではなく食べるだけになる
- ・動物を用いた方法とは異なり、大量生産・常温での長期保存が可能になると期待されている
- ・家畜への投与が簡便になる

※独立行政法人農業生物資源研究所より