

太陽光型植物工場の設計手法に関する研究

原 嶋 寛 住 吉 栄 作 緒 方 浩 基

山 本 縁 中 村 奈 美 杉 崎 和 仁
(本社テクノ事業創成本部) (本社テクノ事業創成本部)

Study on Design Method for Sunlight-type Plant Factory

Hiroshi Harashima Eisaku Sumiyoshi Hiroki Ogata

Yukari Yamamoto Nami Nakamura Kazuhito Sugisaki

Abstract

The control of air temperature and carbon dioxide gas concentration is essential for sunlight-type plant factories to achieve high crop yields. If such indoor conditions and yields could be predicted in advance, efficient plans for factories incorporating optimum control devices for environment and its efficient management would be provided at early design stages. Nevertheless, these estimation methods require further investigations. In this study, they are considered as both a practical calculation method for predicting the environment in a plant factory, and an estimation method for crop yields. The following conclusions are obtained: (1) the considered calculation method exhibits a practical precision for predicting the environment in a plant factory, (2) the photosynthesis model (Farquhar model) and measured environmental data can drive the photosynthesis rate that is a fundamental factor for estimating yields, and (3) the evaluation method combining the above is proven to predict crop yields in a sunlight-type plant factory.

概 要

太陽光型植物工場内の温度や二酸化炭素濃度の制御は、高い収穫量を得るために重要である。太陽光型植物工場内の環境や作物の収穫量を設計段階である程度予測できれば、最適な機器選定や効率的な制御方法等を組み込んだ計画を行うことが可能となる。しかしながら、これらの手法は十分に確立されたとは言えない状況である。そこで本研究では、環境予測に関する実用的な精度と所要時間で結果が得られる計算手法および作物の収穫量予測に関する検討を行い、以下を確認した。(1)検討された計算手法は、実用的な精度で太陽光型植物工場の環境を予測可能なこと、(2)光合成モデルを用いることで、環境データから収穫量に大きく寄与する光合成速度が予測可能なこと、(3)環境予測と光合成モデルを組み合わせることで、収穫量予測が可能なこと、が示唆された。

1. はじめに

本研究で対象とする太陽光型植物工場は、躯体を鋼材で、外壁をポリ塩化ビニルなどの透明なフィルム系材料で構成し、環境制御機能や保管庫といった生産管理機能等をもつ農作物栽培施設である。対象となる太陽光型植物工場の外観をPhoto 1に示す。

太陽光型植物工場内の温度は、日射受熱と換気口の開閉による自然換気で制御される。自然換気による温度制御は、開口面積や位置、内部発熱量、外気温度などが影響するため、建屋形状や制御方法を容易に規格化できない。冬期は急激な温度低下を防止するために、暖房装置が必要となることが多く、夜間は長時間運転させる場合もある^{1),2)}。暖房装置の選定や吹き出し方法などは、現場レベルでのノウハウはあろうが、汎用的な手法について、十分な知見が得られているとは言えない状況にある。冬期は自然換気が頻繁に行われないため、二酸化炭素ガス



Photo 1 対象となる太陽光型植物工場の外観
Appearance of Targeted Sunlight-Type Plant Factory

(以下、CO₂)を供給しやすい期間となる。一部の農業機器メーカーでは、暖房ならびにCO₂発生機能を一体化した装置を販売している。こちらも暖房と同様に、効率的な発生量や吹き出し方法などに課題がある。最終的に太陽光型植物工場内の温度やCO₂濃度等は、作物の収穫量と合わせて議論されるべきものであり、収穫量と栽培環境、

制御コストの最適化は重要な課題である。

太陽光型植物工場の計画手法に関して、農業分野では、作物の光合成速度の評価や予測法に関する研究は多くの報告がある^{3),4)}。一方で、環境予測に関する研究報告は一定数存在するものの、例えば換気口の制御などの研究は十分とは言い難い状況にある⁵⁾。建築分野では、一般的な建物も含めて環境予測や制御に関する研究が農業分野と比べると進んでおり、屋内用ファンや換気口、空調機などの計画を事前に予測評価し、効率的な計画とする手法が確立されている⁶⁾。ゆえに、環境情報と植物の生育情報(光合成速度)を組み合わせることで、太陽光型植物工場に対するより実用的な設計手法を構築できると考えられる。加えて、本手法は、将来的には収穫量予測まで応用可能と考えられる。

このような背景のもと、本研究の目的は、ミニトマト栽培施設を事例とした太陽光型植物工場の実用的な設計手法の構築とする。

2章では、実在の太陽光型植物工場を対象とした温度の測定結果について報告する。3及び4章では、実務利用を前提とした太陽光型植物工場内の環境予測に関する簡易計算手法の検討及び光合成速度に関する予測モデルの整理を行う。5章では、環境予測と光合成速度に関する予測モデルを組み合わせた環境評価手法に関する検討結果を報告する。

2. 太陽光型植物工場の実測調査

2.1 実測概要

本研究では、千葉県香取市に建設されたミニトマト生産を行う太陽光型植物工場を対象とする。対象となる太陽光型植物工場の概要をFig. 1に示す。対象建屋寸法は、117m×48m×7m^(a)であり、内部は仕切りのない一体空間となっている。床面は白色系のシートで地盤面を覆い、中央の通路部のみ土間コンクリートが施工されている。本実測では、作物定植前後における太陽光型植物工場内の温湿度を測定した。期間は、定植前が2017年6月15日から7月31日、定植後が8月21日から9月30日であった。計測は、ロガー機能付きボタン型温湿度センサを用い、計測ピッチは1時間とした。センサの設置位置は、Fig. 1(a)に示す通り、地面から3m地点の計6点である。センサの設置には、Photo 2に示すような日よけとアルミテープを用いることで、日射影響を極力低減するよう配慮した。日射影響に関しては、制御用に設置されている常設の温度センサ値との比較を行い、同様の計測値であったことを事前に確認している。実測期間中は、栽培前の調整期間であったが、雨天日以外は開口を開け、自然換気が行われていたことを確認している。

2.2 実測結果

Fig. 2に7月12日から16日の作物定植前の太陽光型植物工場内平均温度の時系列を示す。図中には、気象データ

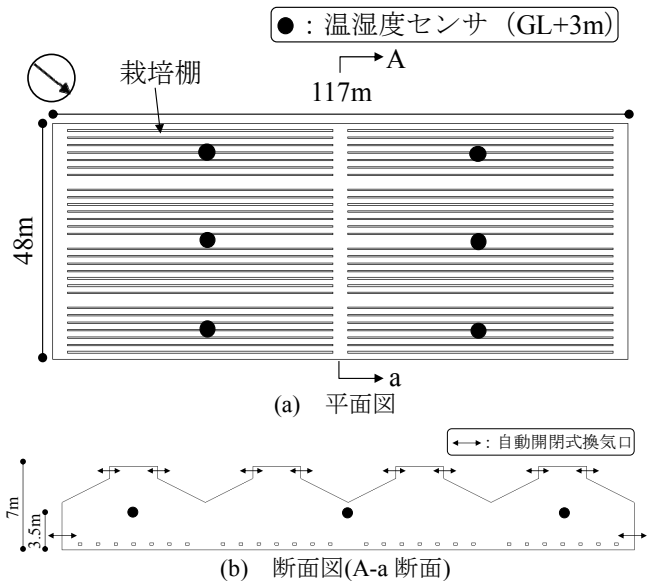


Fig. 1 対象とする太陽光型植物工場の概要
Outline of Targeted Sunlight-type Plant Factory



Photo 2 センサ設置状況
Setting Condition on Sensors

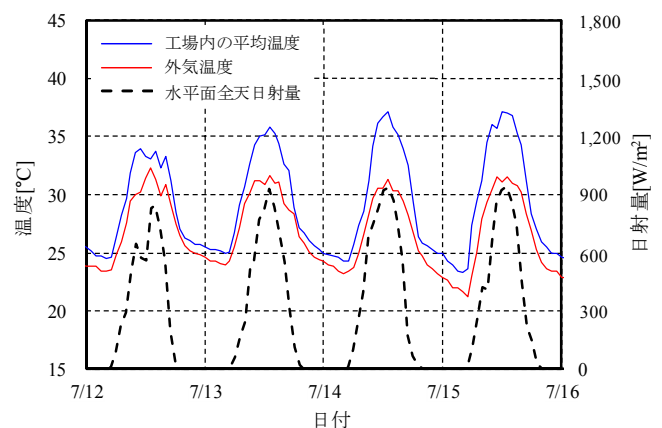


Fig. 2 作物定植前の太陽光型工場内の平均温度及び外気温度、日射量の時系列
Time Course of Mean Air Temperature in Sunlight-type Plant Factory and Outside Air Temperature, Solar Radiation

(外気温：現地測定データ、日射量：つくば市のアメダス気象データ)を併せて示している。

太陽光型植物工場内の平均温度(6点の平均値)は日射

ならびに外気温度と共に上昇し、日中の日射量のピーク時に最高温度となる様子がみられる。すなわち、太陽光型植物工場内の温度を決定する主な要因は、外気温度と日射量、換気量であると推察される。夜間の温度下限値は、太陽光型植物工場内のほうが外気温度よりも高い傾向にある。理由は鋼材等の蓄熱や地盤の影響と考えられるが、その影響は1~2°C程度である。ゆえに、熱容量が相対的に小さい躯体や外壁の影響は、小さいと推察される。また、太陽光型植物工場内の温度分布のバラつきは小さいことを実測結果より確認すると共に、測定高さが建屋の中間部(自然換気上の中性帯付近)に位置することを考慮し、6点の平均値が太陽光型植物工場内の平均温度と仮定した。湿度も測定を行っているが、作物に対する湿度影響等に関する知見が十分でないことを考慮し、今後の検討課題として本報では割愛する。

3. 太陽光型植物工場内の環境予測に関する簡易計算手法

3.1 計算モデルの概要

これより実務利用を前提とした太陽光型植物工場内の環境予測のための計算手法の検討結果を報告する。Fig. 3に対象とする太陽光型植物工場の計算モデルを示す。計画時は、月オーダー以上の長期間における環境予測が望ましいと考え、計算負荷の小さい節点系のモデル化を選択した。形状は簡略化した。各計算節点に対して熱収支式を立て、計算を行う。本手法は、数値流体解析手法と比べると、簡易な計算方法であり、簡易計算手法と呼ぶこととした。本研究で用いる熱収支式を以下に示す。

$$\gamma_{air} V_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_i \alpha c_{in} \cdot A_i \cdot (T_i - T_r) + \sum_k \gamma_{air} \cdot Q_{in,k} \cdot (T_{out} - T_r) + \sum_o HIN_o \quad (1)$$

γ_{air}	: 空気の容積比熱[J/m³K]
V_r	: 室容積[m³]
T_i	: 面番号 <i>i</i> の温度[K]
T_r	: 室温(工場内温度)[K]
t	: 時間[s]
αc_{in}	: 室側対流熱伝達率[W/m²K]
A	: 面積[m²]
Q_{in}	: 流入風量[m³/s]
T_{out}	: 外気温度[K]
HIN	: 内部発熱[W]
下添え字 <i>i</i>	: 面番号
下添え字 <i>k</i>	: 換気口番号
下添え字 <i>o</i>	: 発熱種別

(1)式の右边第一項は対流による壁面との熱移動、第二項は換気による熱移動、第三項は内部発熱を表す。

床面の熱収支式を以下に示す。

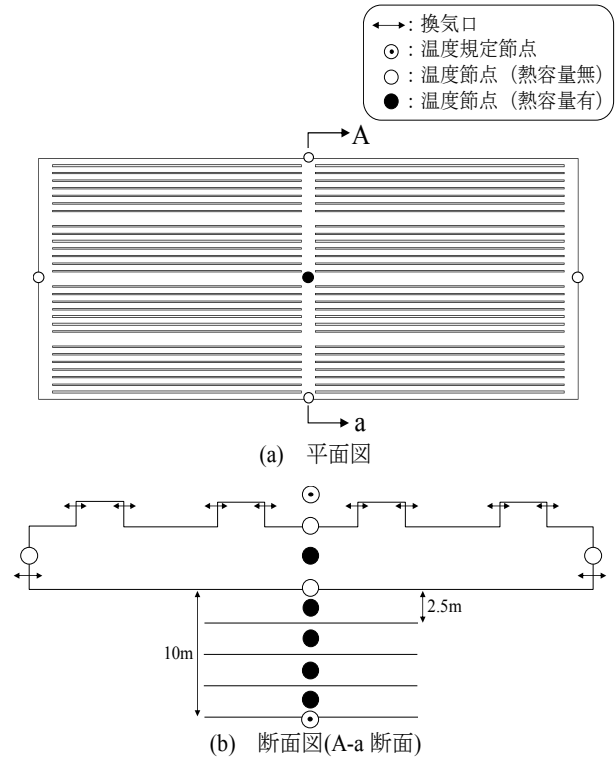


Fig. 3 太陽光型植物工場の計算モデル
Calculation Model of Sunlight-type Plant Factory

$$0 = \alpha c_{in} \cdot A_{fl} \cdot (T_r - T_{fl}) + c_{gr} \cdot A_{fl} \cdot (T_{gr,1} - T_{fl}) + \sum_i \alpha r \cdot A_{fl} \cdot F_{fl \rightarrow i} \cdot (T_i - T_{fl}) + a_{fl} \sum_i \tau_v \cdot IS_i \cdot A_i \quad (2)$$

A_{fl}	: 床面積[m²]
T_{fl}	: 床面温度[K]
c_{gr}	: 地盤の熱コンダクタンス[W/m²]
$T_{gr,1}$	: 地盤第一層目の温度[K]
αr	: 放射熱伝達率[W/m²K]
$F_{fl \rightarrow i}$	: 床面から各面 <i>i</i> に対する形態係数[-]
a_{fl}	: 床面の日射吸収率[-]
τ_v	: ビニルの日射透過率[-]
IS	: 各面へ入射する全日射量[W/m²]

(2)式の右边第二項は地盤の熱伝導、第三項は放射伝達、第四項は透過日射による床面発熱を表す。床面表面材の熱容量は、地盤の熱容量と比べて非常に小さいため、無視する。

天井または壁面の熱収支を以下に示す。

$$0 = \alpha c_{in} \cdot A_w \cdot (T_r - T_w) + \alpha c_{out} \cdot A_w \cdot (T_{out} - T_w) + \sum_i \alpha r \cdot A_w \cdot F_{w \rightarrow i} \cdot (T_i - T_w) + HCW \quad (3)$$

A_w	: 対象とする天井または壁面積[m²]
T_w	: 対象とする天井または壁面温度[K]
αc_{out}	: 屋外側対流熱伝達率[W/m²K]
$F_{w \rightarrow i}$	: 対象とする天井または壁面から各面 <i>i</i> に対する形態係数[-]

HCW : 日射による発熱項[W]

天井および壁面を構成するビニルの熱容量は、実測結果を踏まえ、無視する。(3)式中の HCW は以下とする。

$$HCW = a_v \cdot IS_i \cdot A_i + a_v \cdot A_{fl} \cdot F_{fl \rightarrow i} \cdot IR_{fl} + A_i \cdot NR_i \quad (4)$$

a_v : ビニルの日射吸収率[-]

$F_{fl \rightarrow i}$: 床面から面*i*に対する形態係数[-]

IR_{fl} : 床面からの反射日射量[W/m²]

NR : 実行放射(夜間放射)[W/m²]

ただし、(4)式中の添え字*i*は、(3)式で対象とする天井面または壁面の面番号を表す。

地盤は熱伝導による収支式を立て、深さ10mまでを計算対象とする。

自然換気による換気風量は以下の式で考慮する。

$$Q_k = \frac{\Delta P_k}{|\Delta P_k|} (\alpha A)_k \sqrt{\frac{\rho}{2} |\Delta P_k|} \quad (5)$$

Q : 各換気口における通過風量[m³/s]

ΔP : 換気口前後の圧力差[Pa]

αA : 有効開口面積[m²]

(α は流量係数[-]を表す)

ρ : 空気密度[kg/m³]

ここで、換気口前後の圧力差 ΔP は、室内圧力を未知数とする換気回路網計算より求める。

3.2 計算および境界条件

温度と換気量の計算方法に関して、温度は換気量を既知として更新し、新たに求めた温度より換気量を更新する。これを周期定常計算の中で更新前後の温度差が 10^{-4} 以下になるまで繰り返す。熱収支式の計算には陰解法を、換気式の計算には二分法を採用した。

Table 1に境界及び物性条件を示す。計測された日射量の直散分離には、Erbsモデルを用いた¹¹⁾。地物反射日射は、ビニルの透過率が大きいことを考慮し、無視した。外壁や換気口寸法は、図面や現地調査結果を可能な限り反映した。換気口の制御に関しては、日照有で開、日照無で閉とした。天井部の換気口は開度制御が可能であるが、本報では最大開度を開として計算を実施した。地中温度は、地上10m以下を不易層とみなし、15°Cと設定した¹²⁾。

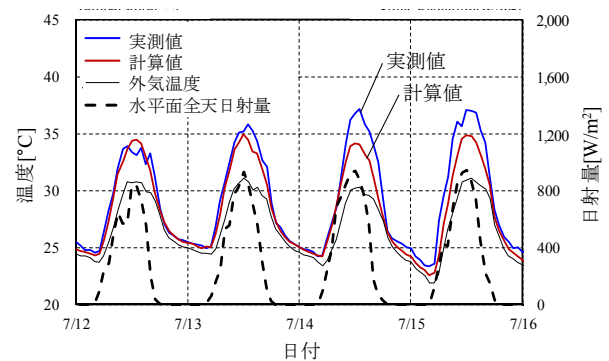
前節の実測結果を対象とした再現計算を行い、実務利用の可否を判断する。計算対象期間は、実測期間の6月～9月を対象とする。本モデルでは作物の影響を考慮していないが、作物定植後の実測値との比較も試みた。

3.3 計算結果

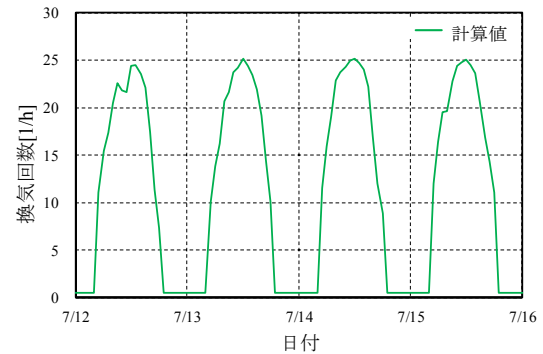
作物定植前における太陽光型植物工場内の温度の計算結果を実測値と併せて時系列で示すと共に、換気回数の時系列をFig. 4にまとめて示す。本報では、天候が比較的安定していた7月の4日間の結果を示す。温度の計算値は、実測値の時系列変化をある程度再現できているものの、

Table 1 境界条件及び物性値一覧
List of Boundary Conditions and Physical Property Values

気象条件	外気温湿度：現地測定データ 日射量：つくば市アメダス気象データ
地盤規定温度	GL-10m 以下は 15[°C]規定
対流熱伝達率	室内側：5.0[W/m ² K] 室外側：17.9[W/m ² K]
放射熱伝達率	4.6[W/m ² K](放射率：一律 0.9[-])
熱伝導率	地盤：1.0[W/mK]
日射物性	ビニル：吸収率=0.15[-]、透過率=0.85[-] 床：吸収率=0.50[-]、反射率=0.50[-]
換気開口	流量係数：一律 0.6[-] 風圧係数：一律 0.0[-] (風圧力換気を無視) 開口の開閉制御：日照有⇒開、日照無⇒閉 開口が閉の時は換気回数 0.5[1/h]を仮定



(a) 温度(外気温度と日射量も併せて表示)



(b) 換気回数

Fig. 4 作物定植前の太陽光型植物工場内の温度と換気回数の時系列

Time Course of Temperature and Air Change Rate in Sunlight-type Plant Factory Before Planting Farm Products

日射のピーク時には最大で3°C程度の差異が確認された。Fig. 5に温度に関する実測値と計算値の比較結果を日照の有無に分けて示す。予測値と実測値の乖離の程度を表すRMSE(Root Mean Squared Error)は、日照無しの場合は0.5°C、日照有りの場合は1.7°Cであった。また、最小二乗法による相関係数は、日照無で0.98、日照有で0.91となった。日照時の計算精度に関して、つくば市の日射量データを用いている点は要因として考えられる。加えて、温度のピーク値は計算値の方が低く予測されていること

を踏まえると、換気口の設定開度に実態と多少の乖離があったと推察される。計算対象とした時期は、栽培前の調整期間でもあり、運用の試運転調整が実測と同時に進められていた。

作物定植後における温度の計算結果の時系列を実測値と併せてFig. 6に示す。本計算では、作物の蒸散等を考慮しておらず、実測値との大きな差異も想定されたが、結果は定植前の傾向と大差はない。実測値は作物定植から約1か月後であり、成長過程のため、蒸散等が温度へ影響するほど活発には行われていない時期ということも考えられる。しかしながら、実際の太陽光型植物工場の設計では、蒸散の影響を無視して空調機器等が選定されることが殆どである。この点は長期的なデータの蓄積が必要であるが、現段階では、作物の影響を陽に計算モデルに組み込まずとも、太陽光型植物工場の設計は可能なことが示唆される。

4. 光合成速度に関する予測モデル

本章では、既往モデル式より、環境条件と光合成速度の関係性を定量的に把握することを目的とする。

4.1 光合成速度の数理モデル化

作物もしくは植物の成長にとって不可欠である光合成は、光エネルギーを利用してCO₂を糖に変える代謝経路である。光合成速度は様々な環境影響を受けるが、今回対象とするトマトの光合成速度は、Farquharらの光合成生化学モデル⁷⁾に基づき算出することを試みた。本モデルでは、光合成速度は個々の葉ごとでRubisco活性と、電子伝達のどちらかが光合成の律速要因となるとし、その最小値を光合成速度であるとして以下の式より求めている。

$$A = \min \{ A_v, A_j \} - R_d \quad (6)$$

- A : 光合成速度 [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
 A_v : Rubisco活性 [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
 A_j : 電子伝達速度 [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
 R_d : 呼吸速度 [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

(6)式の光合成速度 A の算出には、 A_v と A_j を求める必要がある。本報では、 A_v と A_j 算出に関するモデル定数などは既往文献^{8), 9)}の値を採用した。(6)式中の呼吸速度 R_d は、CO₂の吸収と排出に関する速度を表す。本報で対象とする作物に関する呼吸速度は、十分に整理された知見が見当たらないため無視すると、環境因子として考慮すべきは、温度とCO₂濃度、光量子束密度となる。

4.2 光合成速度と環境条件

前節で示したモデル式を用いて推定した光合成速度と光量子束密度およびCO₂濃度との関係をFig. 7とFig. 8に示す。Fig. 7より、CO₂濃度を外気同等と設定した場合、日射量すなわち光量子束密度の増加に応じて光合成速度

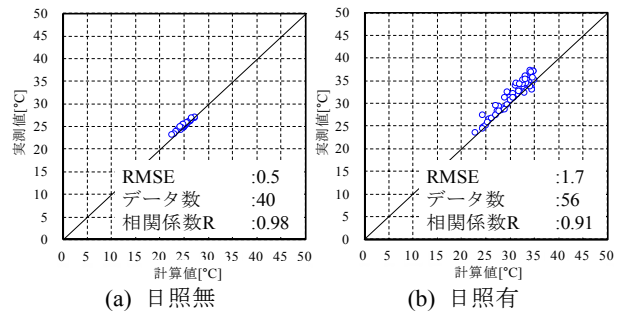


Fig. 5 実測値と計算値の比較

Comparison of Measured Values and Calculated Values

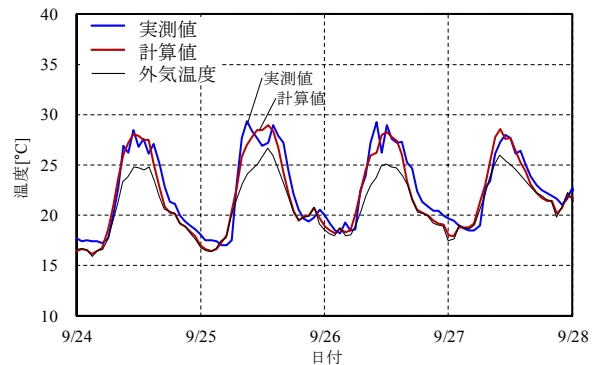


Fig. 6 作物定植後の太陽光型植物工場内の温度の時系列

Time Course of Temperature in the Sunlight-type Plant Factory After Planting Farm Products

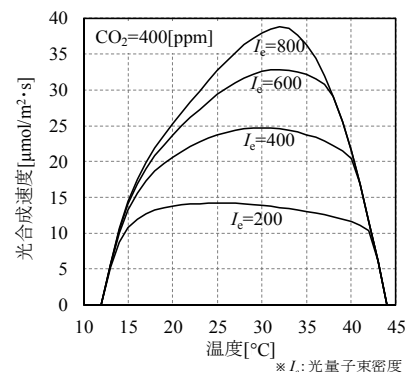


Fig. 7 光合成速度と光量子束密度の関係
Relationship between Rate of Photosynthesis and Solar Radiation

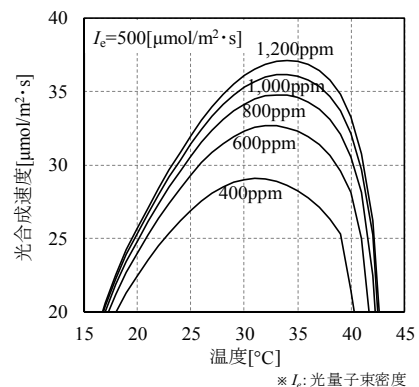


Fig. 8 光合成速度とCO₂濃度
Relationship between Rate of Photosynthesis and CO₂ Concentration

も大きくなることが分かる。加えて、光量子束密度が大きくなるほど光合成速度のピーク幅は狭くなり、次第に高温域へとシフトしている傾向が確認できる。特に光量子束密度が $800[\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}]$ の条件では、葉温を $30\sim 35^\circ\text{C}$ に維持することで光合成速度を大きくすることが可能であるが、一方でこの温度域を超えると効率は大きく低下する。Fig. 8は、 CO_2 濃度を变化させた試算結果を示しており、環境中の CO_2 濃度を高くすることで光合成速度の上昇に一定の効果があるといえる結果となった。ただし、(6)式に示した通り、光合成速度が光量子束密度に律速する環境下では、 CO_2 濃度を高くしてもその速度は横ばい状態となるため、環境制御では両者のバランスを考慮する必要がある。

5. 環境予測と光合成速度に関する予測モデルを組み合わせた環境評価手法

本章では、3章の簡易計算手法と4章の光合成モデルを組み合わせた太陽光型植物工場の環境評価手法の検討結果を報告する。本章では、環境評価手法に関する感度解析を実施し、本手法の応用事例として示す。

5.1 評価の概要

評価対象は3章の太陽光型植物工場とし、評価期間は夏期と冬期を対象とする。冬期に関しては、実測が実施されておらず、実測値との比較による予測精度の確認はできていない。しかしながら、各種予測手法は、夏期と冬期で同様であるため、冬期を含めた感度解析を実施する。気象条件については、拡張アメダス気象データの千葉県佐倉市のデータを用いる。3章では、温度と換気量のみを算出したが、本章では CO_2 濃度と空調負荷も新たに算出して評価項目として用いる。空調負荷については、(1)式の室温(工場内温度) T_r を設定温度として与え、代わりに未知数の発熱項を設定し、設定温度に対する空調負荷としてその発熱項を求める。また CO_2 濃度は、 CO_2 発生装置か

らの発生と換気のみを考慮した濃度収支式より求める。その他の条件等は、3章と同様とする。

評価方法としては、空調負荷や一次エネルギー使用量と光合成速度との比較を試みる。

5.2 検討ケース

検討ケース一覧をTable 2に示す。ケースS-1は、夏期を対象に自然換気のみとした条件、ケースS-2は、室温(工場内温度)により換気開口を制御する条件とした。ケースS-3、S-4は、空調のみで室温(工場内温度)を制御した条件を想定し、設定温度の影響を把握する。ケースW-1は冬期に自然換気及び空調を行わない条件である。ケースW-2は、日照のある時間帯で室温(工場内温度)が 15°C 以下の場合には空調を行い、 15°C を越える場合は非空調を想定したケースである。ケースW-3は、日照のある時間帯は設定温度を 30°C とし、夜間は 15°C としたケースである。冬期の室温(工場内温度)は、作物の生存の観点から $15\sim 35^\circ\text{C}$ の範囲で制御することが一般的とされる²⁾。全ケースの共通事項として、空調時または換気口が閉の場合には、 CO_2 を発生させる条件とした。ここでの CO_2 発生とは、機械設備により CO_2 を強制的に発生させることを意味する。 CO_2 発生量は、本報で対象とする太陽光型植物工場の設計条件を参考にし、 $13.6[\text{m}^3/\text{h}]$ とした。外気 CO_2 濃度は、 400ppm 一定とした。また、対象とする作物の CO_2 の吸収量は、十分な知見が見当たらないため、本報では無視した。

5.3 検討結果

Fig. 9およびFig. 10に夏期および冬期の太陽光型植物工場内の温度と CO_2 濃度の予測結果を示す。ここでは、それぞれ5日間の推移を抜粋して示している。Fig. 10に関して、 CO_2 濃度は、ケースS-3とS-4と同様となるため、割愛する。

夏期の温度は、自然換気を行うと $20\sim 35^\circ\text{C}$ の範囲で推移していることがケースS-1の結果からわかる。しかしな

Table 2 検討ケース一覧
List of Case Studies

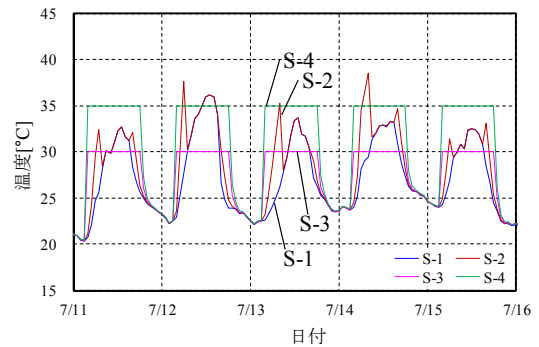
Case No.	期間	自然換気	空調制御(日照有)	空調制御(日照無)	CO ₂ 発生
S-1	夏期(7月)	○ (日照有の時間帯のみ)	×	×	×
S-2		○or× (自然換気開口の開閉を制御し、CO ₂ 発生時間を確保、工場内温度は40℃以下を維持)	×		○ (開口閉かつ日照有の時)
S-3		×	○(設定温度 30℃)		○ (日照有の時)
S-4			○(設定温度 35℃)		
W-1	冬期(1月)	×	×	×	○ (日照有の時)
W-2		×	Δ(工場内温度が15℃以下の時は空調)	○(設定温度 15℃)	
W-3			○(設定温度 30℃)		

がら、自然換気時のCO₂濃度は成り行きとなり、本計算では作物によるCO₂の吸収を無視しているため、CO₂濃度は外気と同等となる。ケースS-2では、換気口の制御を行い、ケースS-1と比べて、CO₂濃度を高められる時間帯が出現していることがわかる。ケースS-3,S-4は空調により温度制御するため、CO₂濃度は1,300ppm程度まで上昇している。

冬期は開口を閉鎖し、自然換気も空調も実施しないとした条件(ケースW-1)では、夜間の温度は15°Cを大きく下回る時間帯が発生している。これは作物が生存不可能とみなされる状況である²⁾。ゆえに、冬期は暖房装置の稼働が必須であり、適切な機器選定は重要な設計項目である。また、冬期でも日射量が大きき場合には、暖房を行わなくとも、温度が30°C以上となることがケースW-2より確認された。日射受熱より、冬期の暖房負荷を小さくする制御もランニングコストの削減手法の一つといえる。

本報では、4章の光合成速度の予測モデルより試算された光合成速度と空調負荷ならびにCO₂発生装置の消費エネルギーとの比較を行った。比較結果をFig. 11に示す。各ケースの値は1か月の積算値とし、光合成速度はケースS-1もしくはケースW-2で基準化している。CO₂発生時に用いられるエネルギーに関しては、メーカーのカタログを参考に一次エネルギー換算値として示す。

Fig. 11(a)より、自然換気のみと自然換気とCO₂発生を想定したケースS-1とS-2を比較すると、光合成速度に大きな差がみられない。すなわち、夏期は自然換気時に換気口の制御を行い、CO₂濃度を高める時間帯を設けても、作物の収穫量には大きな効果が得られない可能性が示唆される。次に、ケースS-3とS-4は空調により温度を制御した場合の検討結果であるが、自然換気時のみの場合と比べて、光合成速度は30%程度の増加が見込める結果となった。また、ケースS-3とS-4を比べると、光合成速度は同等であるが、空調負荷は15%程度の差があり、作物の光合成速度を低下させず、ランニングコストの削減が可能なが示唆される結果となった。Fig. 11(b)に関して、ケースW-1は、作物の生存が困難な環境と判断し、



(a) 温度

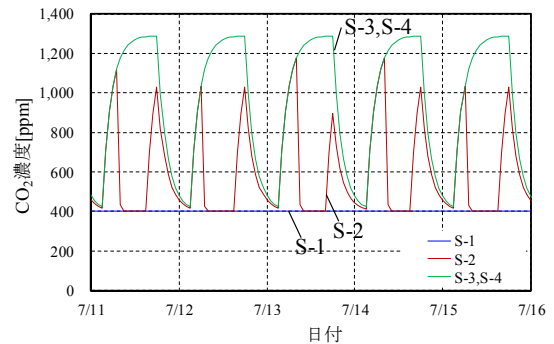
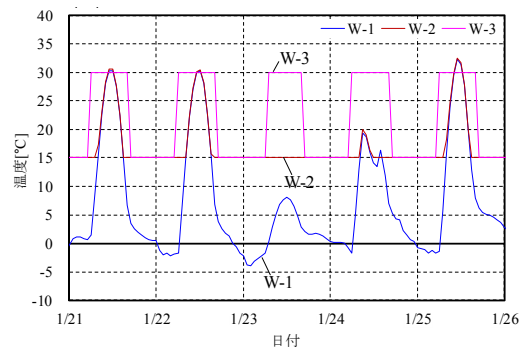
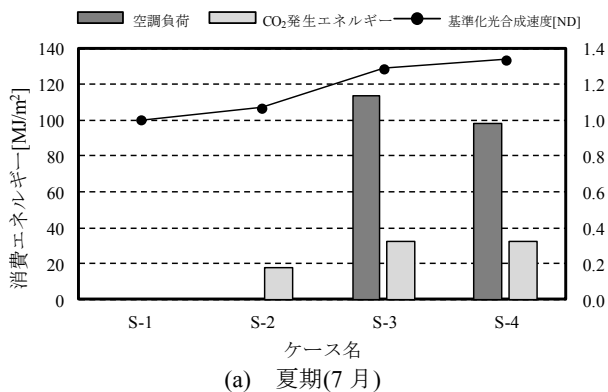
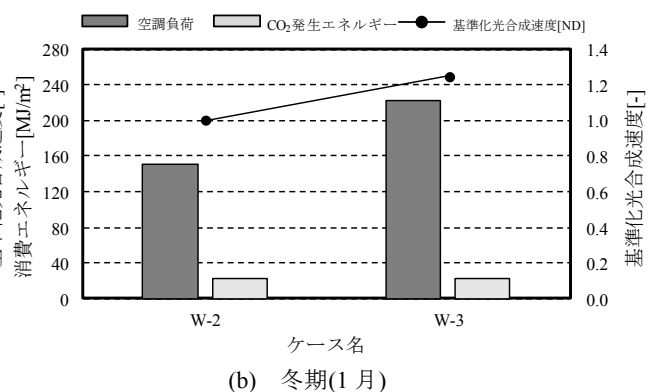
(b) CO₂ 濃度Fig. 9 7月の太陽光型植物工場内の温度とCO₂濃度の予測結果Prediction Results of Temperature and CO₂ Concentration in Sunlight-type Plant Factory in July

Fig. 10 1月の太陽光型植物工場内の温度の予測結果

Prediction Results of Temperature in Sunlight-type Plant Factory in January



(a) 夏期(7月)



(b) 冬期(1月)

Fig. 11 消費エネルギーと光合成速度の比較
Comparison between Energy Consumption and Rate of Photosynthesis

比較対象外とした。ケースW-2とW-3を比較すると、空調負荷は、35%程度、光合成速度は25%程度の差となった。本章での検討は、あくまでも感度解析結果であり、一定の不確かさは含まれており、実務への適用については多くの課題があるとの認識をしている。しかしながら、相対的な評価においても、数十%程度の差が確認されたことを考慮すると、太陽光型植物工場の環境評価において、本手法は有用な手法になりうると考えている。

また、本報では光合成速度の予測に留めているが、光合成速度と収穫量の相関関係が明らかになれば、収穫量予測への発展は可能になると考えている。

以上より、太陽光型植物工場の設計において、本手法は、消費エネルギーと収穫量もしくは光合成速度の最適化を検討するための有用な一助になることが示された。

6. まとめ

本研究では、太陽光型植物工場を対象とした環境評価手法の構築や事例検討を行い、以下を確認した。

- 1) 太陽光型植物工場を対象とした環境予測手法は、実用的な精度を有する
- 2) 光合成速度の予測モデルを整理し、環境情報から収穫量に寄与する光合成速度を予測可能である
- 3) 環境予測と光合成速度の予測モデルを組み合わせた環境評価手法は、将来的には収穫量予測が可能となることが示唆され、太陽光型植物工場の設計のための有用な手法になりうる

光合成速度と収穫量の相関関係の解明や作物の蒸散およびCO₂消費量等のモデル化、工場内の気流分布性状を含めた評価等は今後の課題である。

参考文献

- 1) 杉野堯子，他：寒冷地園芸施設向けの低コストで実用的な地中熱提供方法の開発 その3，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 73-76, 2015
- 2) 笠島佳明，他：農作物成長促進のためのビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 69-72, 2015
- 3) 奥島里美：生鮮野菜生産が可能なサンルーム温室の環境制御法の提案，財団法人大林都市研究振興財団研究助成実施報告書，2008
- 4) 安場健一郎，他：トマト長期多段栽培における統合環境制御下での温室環境と収量の推移，野菜茶業研究所研究報告，No. 10, pp. 85-93, 2011.2
- 5) 高倉直，他：温室の熱収支，農業気象，No. 24, pp. 115-118, 1968.12
- 6) 服部敬太，他：農業用ビニルハウス内の温熱環境実測と吹出温度制御を組み込んだCFD解析，空気調和・衛生工学会論文集，No. 162, pp. 25-34, 2010.9
- 7) Farquhar G. D. et al. : A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species, *Planta* 149, pp. 78-90, 1980
- 8) de Pury D. G. G. and Farquhar G. D. : Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models, *Plant Cell and Environment* 20, pp. 537-557, 1997
- 9) James A. Bunce : Acclimation of photosynthesis to temperature in eight cool and warm climate herbaceous C₃ species, Temperature dependence of parameters of a biochemical photosynthesis model, *Photosynthesis Research* 63, pp. 59-67, 2000
- 10) Sharkey T. D. : Photosynthesis in intact leaves of C₃ plants, *Physics, physiology and rate limitations*, *Botanical Review* 51, pp. 53-105, 1985
- 11) D. G. Erbs, S. A. Klein and J. A. Duffie : Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, *Solar Energy*, Vol. 28, No. 4, pp. 293-302, 1982
- 12) 濱田靖弘，他：積雪地における地下熱利用のための地中温度の予測に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，No. 68, pp. 91-100, 1998.1